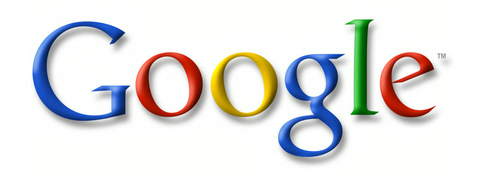


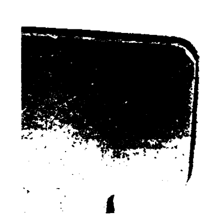
ANKÜNDIGUNG.

Das unter dem Titel „Elektrotechnik in Einzeldarstellungen" erscheinende Sammelwerk, dessen neuntes Bändchen: „Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel" von Dipl.-Ing. Herbert Kyser hiermit vorliegt, ist in erster Linie für Studierende an technischen Hochschulen und für Ingenieure bestimmt, die bereits in der Praxis stehen und über einzelne Gebiete der Elektrotechnik zuverlässig unterrichtet zu sein wünschen.

Das vorliegende Bändchen gibt dem Studierenden und dem projektierenden Ingenieur die Mittel an die Hand, die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel dem heutigen Stande dieses Zweiges der Elektrotechnik entsprechend im wesentlichen kennen zu lernen und beurteilen zu können. Es behandelt die in einzelnen Fällen am zweckmäßigsten zu wählende Spannung und Stromart, die Motoren und die Methoden der Fahrtregulierung und bringt in den letzten Kapiteln die Grundlagen für die Aufstellung eines zeitgemäßen vollständigen Projektes. An Hand sorgfältig ausgewählter Abbildungen und einer Reihe deutlicher Tafeln über Schaltungsschemata für die Triebwagen, die Kraftwerke usw. kann das im Text Gesagte wesentliche Unterstützung finden.

Braunschweig, im August 1907.

Friedrich Vieweg und Sohn.



ELEKTROTECHNIK
IN
EINZELDARSTELLUNGEN

UNTER MITWIRKUNG HERVORRAGENDER FACHMÄNNER
HERAUSGEGEBEN VON
DR. GUSTAV BENISCHKE

NEUNTES HEFT

DIE ELEKTRISCHEN BAHNEN
UND
IHRE BETRIEBSMITTEL

VON
DIPL.-ING. HERBERT KYSER

MIT 73 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN UND 10 TAFELN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1907

DIE

ELEKTRISCHEN BAHNEN

UND

IHRE BETRIEBSMITTEL

VON

DIPL.-ING. HERBERT KYSER

MIT 73 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN UND 10 TAFELN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1907

Published August 15, 1907.

VORWORT.

Das vorliegende neunte Bändchen der „Einzeldarstellungen“ stellt sich die Aufgabe, in großen Zügen alles das zu bringen, was für die erste Projektierung einer elektrischen Bahn von Wichtigkeit ist. Besonders dieses umfangreichste Gebiet der Elektrotechnik erschöpfend zu behandeln, soll mit diesem Werkchen keineswegs bezweckt werden, denn abgesehen von der Fülle des Stoffes, der sich der Bearbeitung darbietet, bringen es die Verhältnisse des elektrischen Bahnbaues mit sich, daß dieser Zweig der Elektrotechnik ein abgeschlossenes Ganze zurzeit noch nicht bilden kann, weil derselbe augenblicklich besonders für Wechsel- und Drehstrom in der Blüte der Entwickelung steht. Die nachfolgende Schrift beabsichtigt vielmehr, Studierende und junge Ingenieure in das Studium der elektrischen Bahnen einzuführen und über das Wesentlichste zu unterrichten. Aus diesem Grunde ist von der Entwickelung langwieriger Formeln abgesehen worden. Vorausgesetzt wird jedoch die Kenntnis der Grundlagen der Elektrotechnik.

Der Umfang des Werkchens legte dem Verfasser manche Kürze in der Behandlung der einzelnen Abschnitte auf, so namentlich bei Besprechung der elektrischen Leitungen für Wechselstrom, doch ist versucht worden, diese Lücke durch Angabe von Literatur auszufüllen. Dem Rahmen des Gesamtwerkes entsprechend wurde die mechanische Seite des elektrischen Bahnbaues nicht behandelt.

Juli 1907.

Dipl.-Ing. **Herbert Kyser.**

INHALTSVERZEICHNIS.

Erstes Kapitel.

Die Einteilung der elektrischen Bahnen, die Stromzuführung, Stromart und Spannung.

1. Einteilung der elektrischen Bahnen.

Die Einteilung der elektrisch betriebenen Fahrzeuge und Bahnen kann nach den verschiedensten Gesichtspunkten erfolgen; die zweckmäßigste und heute fast allgemein gebräuchliche ist diejenige nach der zur Verwendung kommenden Stromart. Man unterscheidet demgemäß:

Gleichstrombahnen:
- a) mit direkter Zuführung des Stromes durch oberirdisch oder unterirdisch fest verlegte Leitungen;
- b) mit reinem oder gemischtem Akkumulatorenbetriebe.

Wechselstrom-Einphasenbahnen:
- a) mit reinem Wechselstrombetriebe;
- b) mit abwechselndem Wechselstrom- und Gleichstrombetriebe.

Bahnen mit Stromumformung auf dem Fahrzeuge selbst.

Dreiphasen- oder Drehstrombahnen.

Das Charakteristische der einzelnen Systeme ist im allgemeinen folgendes. Mit Gleichstrombahnen werden solche Bahnanlagen bezeichnet, deren Betrieb lediglich mit Gleichstrom für Fahrleitung und Achsentriebmotoren erfolgt, einerlei, ob der Strom dem Fahrzeuge von einer Arbeitsleitung mittels Stromabnehmer zugeführt wird, oder ob die Wagen mit der Energiequelle (Akkumulatorenbatterie) selbst ausgerüstet sind. Im letzteren Falle besitzt man die Möglichkeit, einen sogenannten gemischten Betrieb zur An-

wendung zu bringen, der darin besteht, die auch mit Stromabnehmern ausgerüsteten Wagen bzw. Züge teilweise durch die von der Batterie erzeugte Energie, teilweise von einer Kontaktleitung aus zu betreiben. Das wirtschaftlichste und größte Anwendungsgebiet der Gleichstrombahnen erstreckt sich auf Straßen- und Vorortbahnen, Grubenbahnen, Lokomotiven für Verschiebedienst und Industriebahnen.

Die Wechselstrom-Einphasenbahnen gestatten gleichfalls neben einem reinen Betriebe mittels Einphasenwechselstrom auch einen kombinierten durch Anwendung von Wechsel- und Gleichstrom für Fahrleitung und Wagenmotoren. Während sich der reine Betrieb wirtschaftlich weniger für Straßenbahnen, wie vielmehr in der Hauptsache für Bahnanlagen größerer, ja größter Ausdehnung eignet, weil der Hauptvorteil in einer möglichst hohen Spannung für die Kontaktleitung liegt, wird der zweitgenannte etwa dann zu wählen sein, wenn beispielsweise Überlandbahnen einmal direkt auf das Gebiet von Straßenbahnen, die mit Gleichstrom betrieben werden, übergehen oder etwa eine Stadt unter Benutzung der in derselben bestehenden Straßenbahnanlagen durchqueren sollen. Es ist hier, wie kurz erwähnt werden soll, bei der Montage besondere Sorgfalt auf eine vorzügliche Isolierung der Verbindungsstellen zwischen den mit verschiedenen Stromarten und Spannungen gespeisten Arbeitsleitungen zu verwenden, um ein Übertreten von Hochspannung in den Niederspannungsstromkreis und demzufolge eine Gefährdung der Bedienung und der Apparate usw. der nur mit Gleichstrom betriebenen Fahrzeuge zu vermeiden. Daß sich ein derartiger Betrieb ohne Schwierigkeit durchführen läßt, beweist die Versuchsanlage der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft auf der Strecke Niederschöneweide—Cöpenick [1]) bei Berlin.

Bezüglich des Arbeitens der Wagenmotoren bei Wechselstrom bzw. Gleichstrom sei auf die Ausführungen des zweiten Kapitels verwiesen. Die Umschaltung erfolgt durch einen einfachen Steuerschalter, wie in Fig. 1 schematisch angedeutet ist.

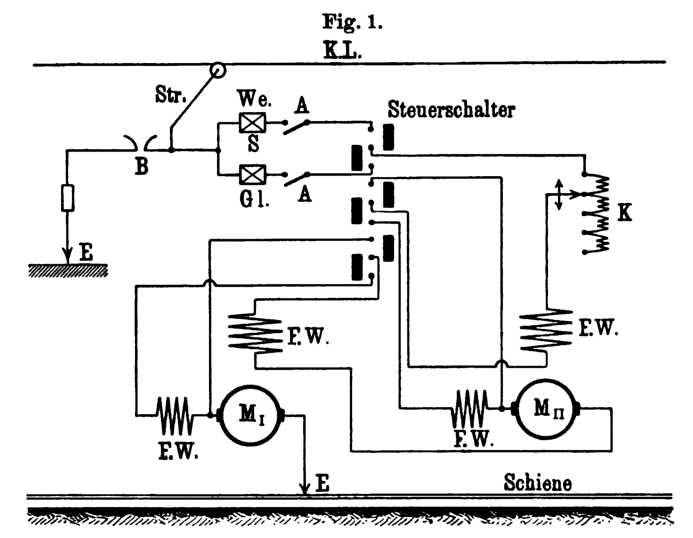
Für den Betrieb von Fahrzeugen, die mit Umformern ausgerüstet sind, kommt auf der Primärseite nur Einphasen- oder

---

[1]) Vgl. E. B. u. B. 1905, Heft 11. Gleichstrom-Wechselstromwagen der A. E. G.

Dreiphasenwechselstrom in Frage. Es ist dieses Bahnsystem im wesentlichen von der Maschinenfabrik Oerlikon in Vorschlag gebracht und ausgebildet worden und eignet sich lediglich für Vollbahnen, bedingt durch das bedeutende Gewicht, das die Lokomotiven in diesem Falle aufweisen. Auf der Primärseite des Systems ist ein Motorgenerator, bestehend aus einem Wechselstrom-Einphasen- oder Dreiphasenmotor in Verbindung mit einem Gleichstromgenerator, auf dem Fahrzeuge aufgestellt, der seinen Strom von einer Fahrleitung aus erhält. Die Sekundärseite ent-

Fig. 1.



hält Gleichstrom-Hauptstrommotoren als Achsentriebmotoren und bietet so den Vorteil, nur Niederspannung im Regulierungsbereich zu besitzen. Diese Anordnung weist neben diesem auch den Vorteil einer ökonomischen Geschwindigkeitsregulierung beim Anfahren und Bremsen auf, was jedoch erst später näher besprochen werden soll. Der Hauptnachteil liegt aber neben einer recht verwickelten Schaltung namentlich in dem hohen Gewicht des Triebwagens [1]) bzw. der Lokomotive und dem dadurch beschränkten Anwendungsgebiete.

[1]) Vgl. Schweizerische Bauzeitung, Bd. XXXIX, Nr. 10, 11, 12 und E. B. u. B. 1906, Heft 17.

Schließlich sind noch die Dreiphasen- oder Drehstrombahnen zu nennen, die in den letzten Jahren häufiger nicht nur für Vollbahnen, sondern auch für Straßenbahnen zur Verwendung gekommen und vorzüglich durch die Firmen Ganz & Co.[1]) und Brown-Boveri & Cie.[2]) ausgebildet worden sind. Nicht unerwähnt soll hierbei jedoch bleiben, daß die bedeutungsvollen Versuche auf der Schnellbahn Marienfelde—Zossen bei Berlin der Siemens & Halske-A.-G. und der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft gleichfalls mit Drehstrom durchgeführt wurden.

2. Stromzuführung.

Die Zuführung des Stromes zum Betriebe der Wagenmotoren kann auf mannigfache Weise erfolgen und hat mit der fortschreitenden Entwickelung der elektrischen Bahnen zahlreiche Ausführungsarten gezeitigt, die man in folgende Hauptgruppen einteilen kann:

1. Die oberirdische Stromzuführung mittels einfacher oder mehrfacher Kontaktleitung.
2. Die unterirdische Stromzuführung.
3. Das Teilleitersystem.
4. Die Stromzuführung von einer isoliert angeordneten dritten Schiene.
5. Akkumulatorenbetrieb (reiner und gemischter Betrieb).

Oft auch werden die Triebwagen für mehrere dieser Stromzuführungssysteme eingerichtet, wodurch sich weiter zahlreiche Kombinationen ergeben. Die geeignete und zweckmäßige Wahl der Stromzuführung für eine neu zu projektierende bzw. umzubauende Bahnanlage muß sich aus dem Charakter und dem Verwendungsgebiet derselben ergeben, und zwar unterscheidet man hierbei zwischen Straßen-, Vorort-, Überland- und Vollbahnen, Schwebebahnen, gleislosen Bahnen, Fahrzeugen für Verschiebedienst, Grubenbahnen usw. Als Hauptgesichtspunkte gelten in erster Linie jedoch Betriebssicherheit, Anlagekapital und jährliche Unterhaltung, und ist im folgenden über diese Punkte das Er-

---

[1]) Die Valtellinabahn von Ganz & Co. Z. d. V. d. I. 1903, Bd. 47.

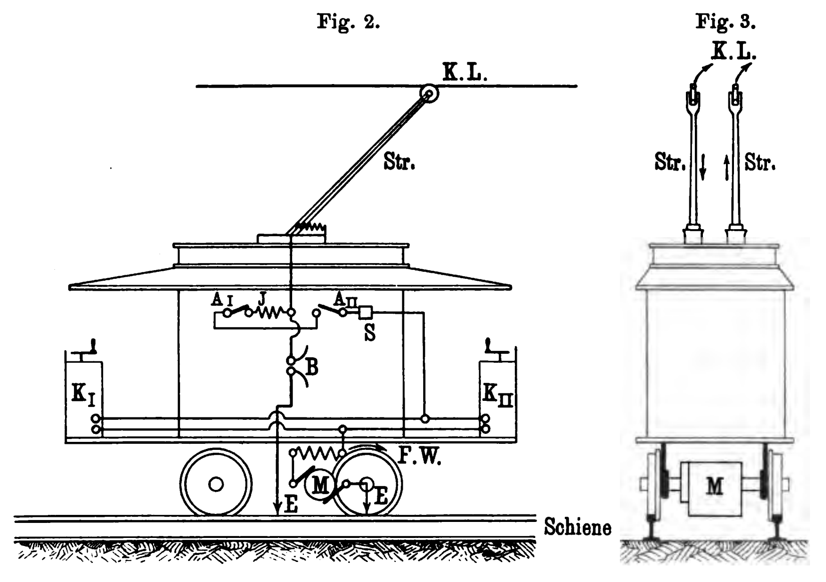
[2]) Die Straßenbahn Alexandrien—Ramleh von Brown, Boveri & Cie., sowie die Gornergratbahn, Simplonbahn usw.

forderliche gesagt. Die für die einzelnen Stromzuführungssysteme gegebenen Figuren stellen dieselben im Schema dar, und zwar bezeichnet:

K. L.	Kontaktleitung.	S.	Sicherung.
Str.	Stromabnehmer.	M.	Motor.
I.	Induktionsspule.	F. W.	Feldwickelung.
A.	Ausschalter.	K_I, K_{II}.	Fahrschalter oder Kontroller.
U.	Umschalter.	B.	Blitzschutzvorrichtung.
Ma. A.	Automatischer Maximalausschalter.	E.	Erde.

Die oberirdische Stromzuführung. Der Strom tritt hier von einer Kontaktleitung (Fahrdraht, Arbeitsleitung), die in

Fig. 2. Fig. 3.

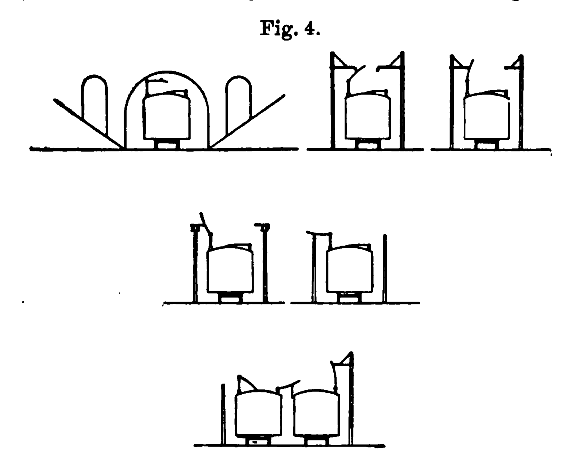


der Mitte oder an den Seiten[1]) der Schienen in einer Höhe von etwa 5 bis 6 m vom Straßenniveau geführt ist, durch den Stromabnehmer (Bügel- oder Rollenabnehmer), die Sicherheitsapparate und den Fahrschalter in die Motoren Fig. 2 u. 3. Die

[1]) Vgl. Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom von S. Herzog, E. B. 1904, Heft 1 und 2. Anordnung der Maschinenfabrik Oerlikon.

Stromrückleitung erfolgt entweder durch die Schienen oder durch einen zweiten, gleichfalls oberirdisch verlegten Fahrdraht. Die Anordnung der Arbeitsleitung in der Mitte des Gleises ist die bisher gebräuchlichste und für alle Bahnsysteme gleich gut geeignet, während die Seitenleitung, d. h. die Führung der Kontaktleitung an den Seiten des Gleises, nur bei Überland- und Vollbahnen mit eigenem Bahnkörper Verwendung finden kann, so namentlich dann, wenn bereits bestehende Strecken für elektrischen Betrieb umgebaut werden sollen. Es gestattet letzteres System der Leitungsführung eine leichte und sichere Montage ohne jegliche Unterbrechung des Betriebes und gewährt den

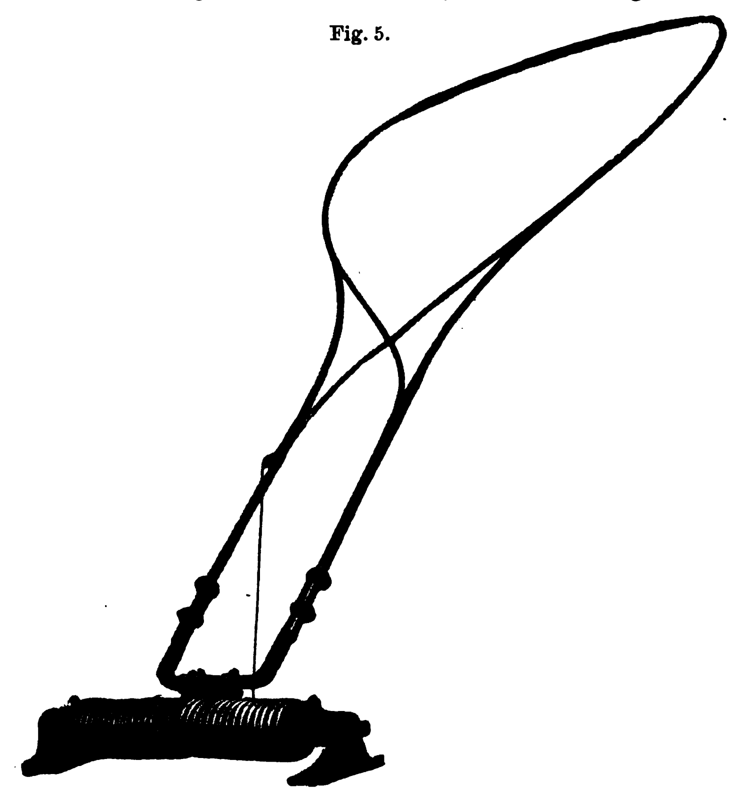
Fig. 4.



Vorteil, Reparaturen bequem vornehmen zu können. Zuerst ist diese Anordnung von der Siemens & Halske - A.-G. vorgeschlagen und bei den Schnellbahnversuchen auf der Strecke Marienfelde — Zossen unter Benutzung eines besonders konstruierten Stromabnehmers zur Anwendung gekommen. Neuerdings hat die Maschinenfabrik Oerlikon dieses Stromzuführungssystem in einer besonderen Form ausgebildet. Hierbei wird unter Verwendung eines patentierten Stromabnehmers die Stromabnahme sowohl von oben und unten, als auch von der Seite des Fahrdrahtes ermöglicht. Fig. 4 veranschaulicht schematisch die einzelnen Lagen des Stromabnehmers bei verschiedenen Fahrdrahtbefestigungen.

Für gewöhnlich bedient man sich eines Rollen- oder Bügelstromabnehmers, wie solche in der gebräuchlichsten Form bei fast allen Bahnen benutzt und als bekannt vorausgesetzt werden. Hinsichtlich der Wahl eines dieser beiden Stromabnehmerarten kann im wesentlichen gelten, daß zweckmäßig bei hohen Fahrgeschwin-

Fig. 5.



digkeiten und ausgedehnteren Weichenanlagen dem Bügelstromabnehmer (Fig. 5) der Vorzug zu geben ist, weil derselbe durch seine Form ein Entgleisen, wie es bei dem Rollenstromabnehmer nicht immer mit Sicherheit vermieden werden kann, unmöglich macht[1]). Ferner wird der Fahrdraht bei Anwendung des Bügels

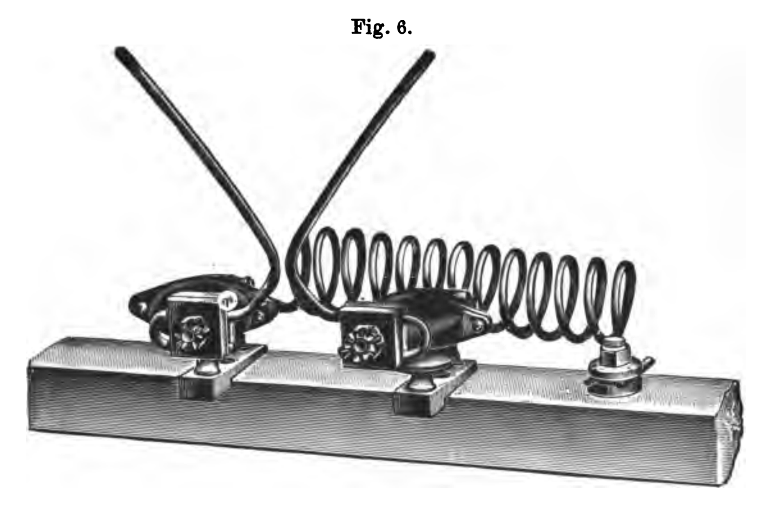
---

[1]) Vgl. E. T. Z. 1898, Heft 7. Stobrawa, Der Bügelschleifkontakt für elektrische Bahnen (Siemens & Halske-A.-G.).

dadurch, daß derselbe mit einer aus Weißmetall bestehenden Kontaktfläche schleift, weniger angegriffen, als dieses namentlich auch in Bahnkrümmungen bei der Rolle der Fall ist.

Wie aus dem Schaltungsschema (Fig. 2) hervorgeht, ist in die Wagenleitung eine Induktionsspule *J* eingeschaltet. Sie wird für gewöhnlich auf dem Dache des Triebwagens befestigt und hat den Zweck, die Wageneinrichtungen bei Blitzschlägen, die die Kontaktleitung treffen, zu schützen dadurch, daß sie den Widerstand der Wagenleitung gegenüber demjenigen der direkten Blitzableiterleitung zur Erde vergrößert und infolgedessen den Weg zur Erde widerstandsfreier gestaltet (Fig. 6).

Fig. 6.



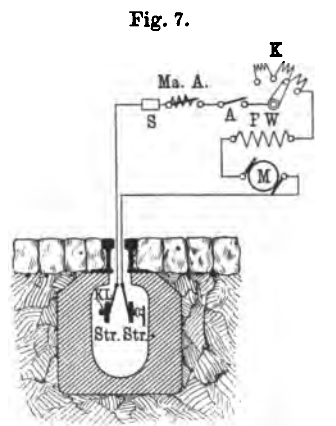
Das Einleitersystem, wie die Stromzuführung mittels nur einer Kontaktleitung kurz genannt werden soll, ist heute das gebräuchlichste und sowohl für Gleichstrom, als auch für Wechselstrom geeignet. Die Rückleitung erfolgt, wie bereits erwähnt, durch die Schienen. Es gewährt diese Fahrdrahtanordnung die größte Betriebssicherheit und erfordert von allen Systemen die geringsten Anlage- und Unterhaltungskosten. Ferner gestattet die Anwendung nur einer Arbeitsleitung die einfachste Leitungsanordnung und -führung, die namentlich in Kurven, Weichen, Kreuzungen und auf Wagensammelplätzen von der größten Bedeutung ist.

Diesen Vorteilen gegenüber steht aber der Nachteil, daß das Straßenbild durch die Leitungs- und Spanndrähte leidet, dem jedoch durch dekorative Ausgestaltung der Masten, Gestänge usw. nach Möglichkeit Rechnung getragen werden kann.

Das Zweileitersystem, bei welchem die Stromrückleitung durch eine gleichfalls oberirdisch verlegte zweite Leitung erfolgt, findet bei Gleichstrom und Einphasenstrom dann Anwendung, wenn die Bahn an physikalischen Instituten und Observatorien vorüberführt und durch den im Erdreich verlaufenden Rückstrom ein störender Einfluß auf das erdmagnetische Feld und somit auf wissenschaftliche Instrumente zu fürchten ist; des weiteren bei gleislosen Bahnen, weil hier durch die Konstruktion der Fahrzeuge an und für sich und den Fortfall jeglichen Gleises eine Stromrückleitung durch die Erde ausgeschlossen ist.

Bei Drehstrombahnen ist gleichfalls eine doppelte Oberleitung erforderlich; die dritte Phase liegt an den Schienen, wobei jedoch durch die Induktionswirkungen des Wechselstromes in benachbarten, unterirdisch verlegten Telephon-, Telegraphen- und Signalleitungen Störungen hervorgerufen werden können, so daß man oft gezwungen ist, letztere isoliert zu verlegen.

Fig. 7.



Die konstruktive Durchbildung der Weichen- und Kreuzungsanlagen bei doppelter Kontaktleitung verursacht häufig bedeutende Schwierigkeiten. Eine besondere Konstruktion des Stromabnehmers und der Luftweichen ist die von der Firma Brown, Boveri & Cie. für die Simplonbahn gefundene[1]), die eine wesentliche Vereinfachung der Fahrdrahtanordnung und große Betriebssicherheit aufweist.

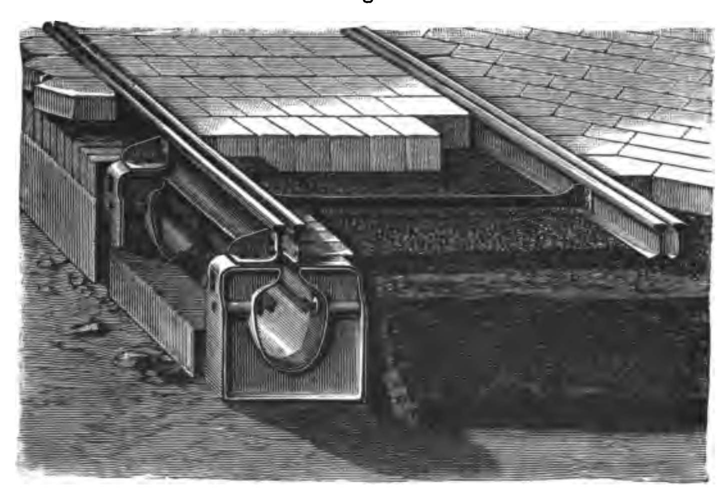
Die unterirdische Stromzuführung. Die Kontaktleitungen, Hin- wie Rückleitung, sind in einem Schlitzkanal im Straßenpflaster geführt (Fig. 7). Die verschiedenen Aus-

[1]) Vgl. E. B. u. B. 1906, Heft 23.

führungen, die teilweise in die Praxis Eingang gefunden haben (Siemens & Halske-A.-G., Ofenpester Straßenbahn[1]), teilweise nur angegeben worden sind, sollen in ihren Einzelheiten nicht besprochen werden, denn das zugrunde liegende Prinzip ist stets das gleiche.

Der Strom wird durch einen unter dem Wagen angeordneten Schleifkontakt dem Fahrdraht entnommen und durch eine gleiche Vorrichtung wieder abgeführt. Diese Stromzuführungsart wird dann zu wählen sein, wenn aus Geschmacksrücksichten das Straßenbild nicht beeinträchtigt werden soll. Zum Zwecke einer

Fig. 8.



völligen Betriebssicherheit ist eine außerordentlich sorgfältige Ausführung und Instandhaltung der Leitungsanlage erforderlich. Infolge der umfangreichen Entwässerungsanlagen der Leitungskanäle sind die Anlage- und Unterhaltungskosten ganz erhebliche, so daß dieses Stromzuführungssystem nur selten zur Anwendung kommt, und zwar lediglich für Straßenbahnen. In Fig. 8 ist eine unterirdische Leitungsführung, wie sie von der Siemens

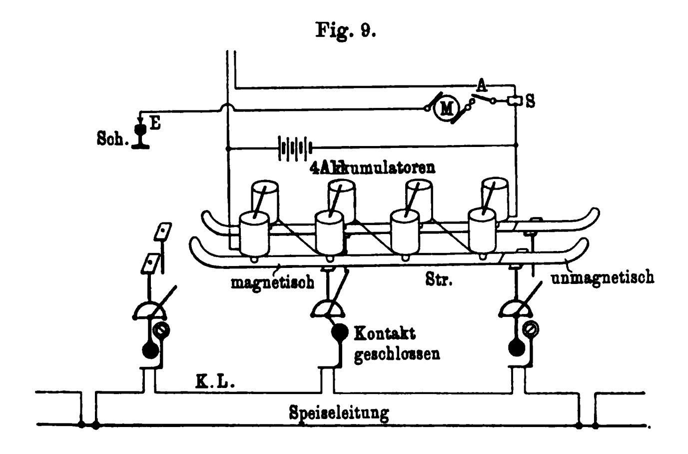
---

[1]) Vgl. Vortrag des Regierungsbaumeisters G. Braun auf der fünften Jahresversammlung des V. D. E.: Die elektrischen Stadtbahnen, Straßeneisenbahnen usw. zu Ofenpest.

& Halske-A.-G. bei der Ofenpester Bahnanlage zur Ausführung gebracht worden ist, dargestellt. Man erkennt aus derselben deutlich die getrennte Anordnung von Hin- und Rückleitung.

Das Teilleitersystem. Die Stromzuführung erfolgt hier durch Bodenkontakte, die in der Mitte des Gleises verlegt sind und mit der Kontaktleitung durch zweckentsprechende Relais verbunden werden. Mittels besonderer unter dem Wagen befestigter Magnete werden die Kontaktknöpfe aufgerichtet und bilden in dieser Stellung die Stromverbindung. Die Rückleitung erfolgt durch die Schienen. Fig. 9 gibt ein schematisches Bild

Fig. 9.



der Teilleiterstromzuführung System Dolter[1]). Ein magnetischer Kontaktschlitten, der von der kleinen Akkumulatorenbatterie erregt wird, gleitet über die Bodenkontakte und bringt diese in Tätigkeit. Der Schlitten ist nur auf einem Teile seiner Länge magnetisch, wodurch bewirkt wird, daß der zu verlassende Kontakt stromlos wird, der Kontakthebel also abfällt, bevor noch der Kontaktschlitten selbst denselben verlassen hat.

Infolge der verhältnismäßigen Betriebsunsicherheit und der Gefahr für Menschen und Tiere, bei ungenügendem Funktionieren der Bodenkontakte mit unter Spannung stehenden Teilen in Berührung zu treten, ist dieses System bisher wenig zur Anwendung

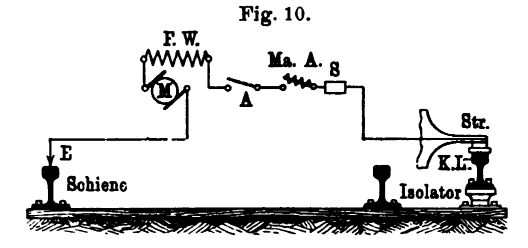
[1]) Vgl. E. B. 1904, Heft 13.

gekommen [1]. Hinsichtlich seines Verwendungsgebietes an und für sich gelten die gleichen Gesichtspunkte, wie für das unterirdische Stromzuführungssystem. Die Anlage- und Unterhaltungskosten sind erheblich höhere, wie diejenigen für die Oberleitung.

Während sich von den bisher besprochenen Arten der Zuführung des Betriebsstromes die oberirdische Anordnung für jedes Bahnsystem eignet, finden die beiden letzten ausschließlich für Straßenbahnen mit Gleichstrom Anwendung.

Die Stromzuführung von einer isoliert angeordneten dritten Schiene dagegen ist nur dort zulässig, wo ein Betreten des Fahrdammes von nicht instruierten Personen ausgeschlossen ist, weil beide Pole zu ebener Erde liegen und ein Berühren derselben bei der heute gewählten hohen Betriebsspannung von 500 bis 750 Volt und höher lebensgefährlich ist. Es kommen

Fig. 10.



somit hier nur Hoch- und Untergrundbahnen [2], sowie Vorort- und Vollbahnen mit eigenem, abgeschlossenem Bahnkörper in Frage; die Betriebsstromart ist Gleichstrom.

Die Kontaktleitung wird durch eine entweder zwischen den Gleisen, oder an der Außenseite derselben isoliert angeordnete Schiene gebildet; die Stromabnahme erfolgt durch Schleifkontakte, die Stromrückleitung durch die Laufschienen (Fig. 10). Hinsichtlich seiner Betriebssicherheit, Anlage- und Unterhaltungskosten ist dieses Stromzuführungssystem demjenigen mit Oberleitung gleichwertig. Eine Schwierigkeit liegt aber auch hier in der Gestaltung der Weichen- und Kreuzungsanlagen, weil notgedrungen

---

[1] Vgl. E. B. u. B. 1906, Heft 22. Das Teilleitersystem nach System Křižík. Zeitschr. f. Kleinbahnen 1898, Heft 8. Kritische Betrachtungen über die Teilleiterstromzuführung für elektrische Bahnen.

[2] Vgl. Der Wagenpark der Berliner Hoch- und Untergrundbahn, E. B. 1904, Heft 6 u. 7, ausgeführt von Siemens & Halske-A.-G.

eine Unterbrechung der stromzuführenden Schiene eintreten muß. Durch geeignete Ausbildung des Stromabnehmers kann jedoch dieser Übelstand beseitigt werden.

Der Akkumulatorenbetrieb. Derselbe ist entweder ein sogenannter reiner Betrieb, d. h. jeder Motorwagen führt eine Batterie mit sich, oder ein gemischter, wenn die Motorwagen neben der Batterie auch mit Stromabnehmern ausgerüstet sind, mit Hilfe derer die Motoren streckenweise mit Strom vom Kraftwerke gespeist werden.

Die Hauptvorzüge des ersten Systemes liegen in dem Fortfall jeglicher Kontaktleitung, der Unabhängigkeit der Wagen von der Kraftstation und in einer durchschnittlich gleichbleibenden Belastung der Zentrale und würden infolgedessen diese Stromzuführungsart zu der vollkommensten machen, wenn ihr nicht auch schwerwiegende Nachteile anhaften würden. Dieselben bestehen erstlich in den Akkumulatoren selbst, die infolge ihrer geringen Widerstandsfähigkeit gegen Überlastungen und Erschütterungen, wie sie der Bahnbetrieb mit sich bringt, den hohen Anforderungen desselben auf die Dauer nicht gewachsen sind, ferner in ihren hohen Unterhaltungskosten und in ihrem großen Gewichte. Es wird infolgedessen ein besonders starker Unterbau notwendig, der neben bedeutenden Anlagekosten eine dauernde und kostspielige Beaufsichtigung erfordert. Diesen Umständen ist es auch zuzuschreiben, daß sich der Akkumulatorenbetrieb bisher nur schwer Eingang zu verschaffen gewußt hat, ja dort sogar, wo er ursprünglich in Anwendung war, zu anderen Stromzuführungssystemen übergegangen wurde (Karlsruhe, Berlin usw.).

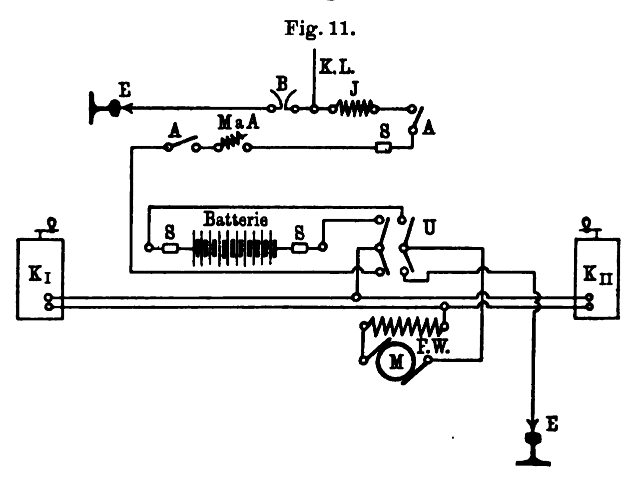
Die Ladung der Batterie erfolgt zumeist auf den Endstationen von Ladepunkten aus, die mit dem Kraftwerke durch unterirdische Leitungen verbunden sind. Eine wirtschaftliche Anwendung dieses Systems findet heute im allgemeinen nur noch für Verschiebelokomotiven statt.

Der gemischte Betrieb ist eine Kombination des Akkumulatorensystems mit einer der bisher besprochenen Stromzuführungsarten und verbindet demgemäß die entsprechenden Vor- und Nachteile derselben.

Die Ladung der Batterie erfolgt hier während der Fahrt von der beispielsweisen Oberleitung. Die Akkumulatoren müssen

dementsprechend für schnelle Ladung konstruiert sein, erfordern also der hohen Stromstärken wegen große Plattenoberflächen, da die Ladezeit selten mehr als 10 bis 15 Minuten betragen wird. Fig. 11 stellt das Stromzuführungsschema einer Akkumulatoren-

Fig. 11.



lokomotive dar, in dem jedoch der Deutlichkeit wegen die Schaltung für die Ladung fortgelassen ist, die einfach durch einen doppelpoligen Umschalter bewirkt wird.

3. Stromart und Spannung.

Über die zu wählende Stromart und Spannung für das Kraftwerk und den Betrieb selbst ist zunächst im allgemeinen zu bemerken, daß neben dem bisher üblichen Gleichstrom von 500 bis 750 Volt Spannung nicht nur dieser in bezug auf die Spannung und die diesbezügliche Ausgestaltung der Motoren immer weitergehende Fortschritte gemacht hat, sondern neuerdings auch der Einphasen- und Dreiphasenstrom zum Betriebe elektrischer Bahnen in ausgedehnterem Maße Verwendung findet. Auch die Spannungen in Speise- und Arbeitsleitungen haben die Höhe von 750 Volt weit überschritten.

Für die Bestimmung der zweckmäßigsten Stromart und Spannung sind in erster Linie die Herstellungs- und Unterhaltungskosten, sowie die hieraus resultierende Wirtschaftlichkeit

der gesamten Anlage maßgebend, ferner aber auch die Art des Betriebes an sich, und zwar, ob ein straßenbahnähnlicher oder ein vollbahnähnlicher Betrieb zur Durchführung kommen soll, dessen charakteristische Eigentümlichkeit im wesentlichsten nachstehende ist.

Unter straßenbahnähnlichem Betriebe ist ein solcher zu verstehen, bei welchem innerhalb kurzer Zeitabschnitte, ca. 5 bis 20 Minuten, kleine Zugeinheiten, bestehend etwa aus einem Motorwagen mit einem oder zwei Anhängewagen, abgelassen werden, die Zugfolge somit eine dichte ist. Die hierbei zu übertragenden Energiemengen sind nicht erhebliche (etwa 50 bis 100 PS) und die Strecken nicht länger, als etwa 10 bis 20 km, während die Niveauverhältnisse oft recht bedeutende Unterschiede aufweisen. In diesem Falle wird die Wahl von Gleichstrom für den Betrieb wohl immer die vorteilhaftere sein und allen Anforderungen in bezug auf Betriebssicherheit, Anlagekapital und Wirtschaftlichkeit genügen. Durch die dichte Aufeinanderfolge der Züge wird weiter die Maximalbelastung des Kraftwerkes weniger von der Durchschnittsbelastung abweichen, ein Umstand, der für die Größenbestimmung und für die wirtschaftlich beste Ausnutzung desselben während der Hauptbetriebszeiten von wesentlicher Bedeutung ist. Man ist ferner auch in der Lage, Akkumulatorenbatterien als sogenannte Pufferbatterien (vgl. siebentes Kapitel) in der Kraftstation zur Unterstützung und Schonung der Generatoren aufzustellen und so den Gesamtwirkungsgrad der Anlage um einen nicht unbeträchtlichen Teil zu erhöhen.

Handelt es sich um ausgedehntere oder weitverzweigte Bahnnetze, so hat man auch hier durch die Anwendung von Akkumulatorenbatterien für einzelne Streckenabschnitte die Möglichkeit einer hohen Betriebssicherheit. Erwähnenswert ist besonders mit Rücksicht auf diesen Punkt die neue Bahnanlage der Rheinuferbahn zwischen Köln und Bonn, die von den Siemens-Schuckert-Werken ausgeführt worden ist und wobei auf einzelnen Streckenabschnitten die Speisung als Unterstützung des Kraftwerkes von derartigen Streckenbatterien aus erfolgt. Auch die Errichtung von Umformerwerken bietet manche Vorteile, die in erster Linie darin liegen, daß denselben in der Regel hochgespannter Drehstrom zugeführt wird, die Lage des Hauptkraft-

werkes demzufolge also weniger eng an die zu speisenden Strecken gebunden ist. Weiter lassen sich auch die Erstellungskosten der ganzen Anlage einmal durch die geringen Kupfermengen für die Hochspannungszuleitungen und ferner durch geeignete Wahl der Plätze für die Umformerwerke zu den von ihnen aus zu speisenden Strecken wesentlich reduzieren.

Einen der Hauptvorzüge der Gleichstromsysteme bilden nun aber die zur Verwendung kommenden Wagenmotoren, denn es gibt zurzeit keinen Bahnmotor, der sich hinsichtlich Betriebssicherheit, leichter Schaltmöglichkeit, Anpassungsvermögen an vorhandene Verhältnisse, Gewicht usw. so günstig gestaltet, wie der Gleichstrommotor (vgl. zweites und fünftes Kapitel). Dieser Tatsache ist es auch zuzuschreiben, daß bisher der Gleichstrom zum Betriebe elektrischer Bahnen die ausgedehnteste Anwendung gefunden hat.

Hinsichtlich der Spannung, die für die Arbeitsleitung und für die Motoren zu wählen ist, ist man jedoch oft an bestimmte Grenzen gebunden, die in Städten und stark bevölkerten Gegenden behördlicherseits festgelegt sind. So sind im allgemeinen für Straßen- und Vorortbahnen ohne eigenen Bahnkörper Spannungen zwischen 500 und 750 Volt als äußerste Grenzen zulässig, während heute Gleichstrommotoren für wesentlich höhere Spannungen bis 2000 Volt ohne Schwierigkeit gebaut werden können. Es kann hierdurch, wie leicht einzusehen ist, ganz bedeutend an Anlagekapital mit Rücksicht auf die Kosten der Leitungsanlage gespart werden. Namentlich die Siemens-Schuckert-Werke haben neuerdings Hochspannungsgleichstrommotoren zur Ausführung gebracht, die hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit und ihres Gewichtes den bisherigen Niederspannungsmotoren in keiner Weise nachstehen und so die Möglichkeit geben, Gleichstrom auch für Überland- und Vollbahnen [1]) als Betriebskraft ohne jegliche Zwischenglieder, wie Umformer, Zusatzmaschinen usw., zu verwenden.

---

[1]) Einen vollgültigen Beweis für die unbedenkliche Anwendung hochgespannten Gleichstromes für den direkten Betrieb der Achsentriebmotoren liefert die von den Siemens-Schuckert-Werken erstellte Rheinuferbahn zwischen Köln und Bonn, die auf freier Strecke mit 1000 Volt und in den Städten mit 550 Volt — im letzteren Falle natürlich bei verminderter Geschwindigkeit — betrieben wird. Näheres siehe E. B. u. B. 1906, Nr. 26, 27 u. 28.

Ist im Gegensatz zu den bisherigen Ausführungen Vollbahn- oder vollbahnähnlicher Betrieb gefordert, so gestaltet sich die Betriebsführung wesentlich anders. Die Zugeinheiten werden größer und schwerer und die Verkehrsdichte nimmt ab, d. h. die Züge werden erst innerhalb längerer Zeitintervalle aufeinander folgen. In diesem Falle, namentlich aber auch, wenn es sich um lange Strecken handelt, wird der Wechsel- bzw. Drehstrom dem Gleichstrom überlegen sein, weil zumeist die Bedingung gestellt sein wird, große Energiemengen bis zu 1000 und mehr Pferdestärken auf weite Entfernungen zu übertragen, was wirtschaftlich nur mittels hochgespannten Stromes möglich und durch eine kurze Überschlagsrechnung leicht zu finden ist.

Die Anlage- und Unterhaltungskosten sind in bedeutendem Maße abhängig von den erforderlichen Kupfermengen für Speise- und Arbeitsleitungen, welche daher bei der Bearbeitung größerer Projekte einer genauen Berechnung und Durchkalkulierung unterzogen werden müssen. Die bekannte Gleichung 1) für den in einer Leitung von der Länge l Meter auftretenden Verlust durch Stromwärme

$$V = \varepsilon J = \frac{J^2 . l}{q} \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

oder

$$q = \frac{J^2 . l}{V} \varrho,$$

worin q den Querschnitt in mm², J die Stromstärke in Ampere, ϱ den spezifischen Widerstand, ε den Spannungsverlust bedeutet, sagt aus, daß bei gleicher Länge, gleichem prozentualen Spannungsverlust und gleichen zu übertragenden Energiemengen der Querschnitt proportional mit dem Quadrate der Betriebsstromstärke wächst.

Beträgt z. B. die zu übertragende Leistung 1000 PS, die Entfernung bis zu einem Speisepunkte etwa 5 km und der als höchst zulässig erachtete Spannungsverlust ε 10 Proz. der Betriebsspannung, so wird im allgemeinen:

a) wenn die Spannung in der Speiseleitung $E = 1000$ Volt

$$J = \frac{1000 . 736}{1000} = 736 \text{ Amp.}$$

und

$$q = \frac{736^2 . 10000}{100 . 736} 0{,}0175 = 1288 \text{ mm}^2;$$

b) wenn

$$E = 5000 \text{ Volt},$$
$$J \cong 147 \text{ Amp.},$$
$$q = 51{,}45 \text{ mm}^2$$

und infolgedessen die aufzuwendenden Kupfermengen

$$\text{für a) } M_1 = 10 \,.\, 11\,592 = 115\,920 \text{ kg},$$
$$\text{für b) } M_2 = 10 \,.\, 463{,}05 = 4630{,}5 \text{ kg}$$

betragen, wenn das spezifische Gewicht des Kupfers = 9,0 angenommen wird. Das Beispiel zeigt in einfachster Weise, daß es bei Übertragung großer Energiemengen Hauptbedingung ist, die Spannung in den Speiseleitungen möglichst hoch zu wählen.

Für die Wahl der Spannung in der Arbeitsleitung ist in erster Linie die Stromstärke maßgebend, die von den Stromabnehmern der Fahrleitung entnommen werden kann, ohne daß erstere unverhältnismäßig schwer konstruiert werden müssen und infolgedessen an der notwendigen Elastizität verlieren, die sie für eine funkenlose Stromentnahme und mit Rücksicht auf die Anordnung des Fahrdrahtes besitzen müssen. Des weiteren ist auch das Gewicht der gesamten Wagenausrüstung für die Stromstärke und bei gegebener Leistung damit auch für die Spannung in der Kontaktleitung von großer Bedeutung, weil mit dem vermehrten toten Gewichte, das bei jeder Fahrt mitbefördert werden muß, die Eigenkosten des Betriebes in nicht unerheblichem Maße wachsen.

Ferner ist bei Oberleitungen — und solche kommen bei Wechselstrombahnen nur zur Anwendung — der Druck der Stromabnehmer gegen die Fahrleitung ein beschränkter, einmal zwecks Schonung der Arbeitsleitung selbst und dann, um, wie schon gesagt, eine funkenlose Stromentnahme zu erzielen. Erfahrungsgemäß können etwa bis 300 Amp. ohne schädlichen Einfluß auf die Kontaktleitung derselben mit Hilfe von einem oder zwei Stromabnehmern [1]) entnommen werden, so daß sich eine Arbeitsleistung:

---

[1]) Vgl. „Der Betrieb der Veltlintalbahn mit hochgespanntem Drehstrom“ von E. Cserhàti u. Koloman v. Kandò, Z. d. V. d. I. 1903.

bei	1000	Volt	etwa	von	400 PS
„	1500	„	„	„	600 „
„	2000	„	„	„	800 „
„	2500	„	„	„	1000 „
„	3000	„	„	„	1200 „
„	5000	„	„	„	2000 „

ergibt. Eine höchste Fahrdrahtspannung von etwa 2500 bis 3000 Volt würde somit den heutigen Anforderungen genügen. Im allgemeinen gilt jedoch der Grundsatz, die Spannung in der Arbeitsleitung nur so hoch zu wählen, als sich für dieselbe die Motoren und Apparate mit genügender Betriebssicherheit bauen lassen, anderenfalls müssen Transformatoren auf der Strecke aufgestellt werden. Eine in dieser Beziehung neue und interessante Anlage bildet die Versuchsanlage der schwedischen Staatsbahnen auf der Strecke Tomteboda—Värtan bei Stockholm, die für Vollbetrieb eingerichtet ist und mit Einphasen-Wechselstrom gespeist wird. Die Fahrleitungen werden hier mit Spannungen verschiedener Höhe, und zwar mit 5000, 7500, 10000, 12500, 15000, 17500 und 20000 Volt gespeist, und es ist Hauptaufgabe der Versuche, festzustellen, bis zu welchen Grenzen die Spannung in den Arbeitsleitungen mit Rücksicht auf eine gute und sichere Stromentnahme, die Fahrleitung selbst und die elektrischen Einrichtungen der Triebwagen (Lokomotiven) mit genügender Betriebssicherheit gewählt werden kann. Nur beiläufig sei bemerkt, daß die Achsentriebmotoren naturgemäß unter Zwischenschaltung eines Transformators, der gleichzeitig zur Regulierung der Geschwindigkeiten benutzt wird, mit Niederspannung betrieben werden (vgl. drittes Kap.). Die Lokomotiven wurden von den Siemens-Schuckert-Werken, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft und der British Westinghouse Co. geliefert.

Die in letzterer Zeit dem öffentlichen Verkehr übergebenen Einphasen- und Dreiphasenbahnen (Spindlersfeld; Murnau—Oberammergau; Borinage; Veltlintalbahn; Simplonbahn usw.) haben den vollgültigen Beweis geliefert, daß die mit diesen Stromarten ausgerüsteten Bahnanlagen namentlich auch zur Beförderung größerer und schwererer Zugeinheiten, also Vollbahnbetrieb, nicht nur in jeder Weise betriebssicher und wirtschaftlich arbeiten, sondern auch das empfindlichste Glied der ganzen Anlage — der

2*

Motor — für höhere Spannungen ohne Schwierigkeit mit gleicher Sicherheit gebaut werden kann, wie der Gleichstrommotor. Hinsichtlich der Arbeitsweise der einzelnen Motoren sei auf die folgenden Kapitel verwiesen.

Für die zweckmäßigste Wahl dieses oder jenes Systems der Stromart und Spannung lassen sich bindende Regeln nicht aufstellen, vielmehr kann das einem bestimmten Zwecke Entsprechende nur mit Hilfe genauer und sorgfältiger Berechnungen und Kostenaufstellungen unter gleichzeitigem Vergleich zwischen verschiedenen Systemen gefunden werden. Es sind hierbei sämtliche für die betriebsfertige Erstellung der Gesamtanlage aufzuwendenden Mittel zu berücksichtigen, denn nur so wird man in der Lage sein, ein wirtschaftliches und konkurrenzfähiges Projekt aufzustellen.

Zur Unterstützung für die ersten Annahmen eines zu entwerfenden Projekts sollen im folgenden noch einige Angaben hinsichtlich der Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme gemacht werden.

Handelt es sich um einfache Straßenbahnanlagen innerhalb von Städten mittlerer Ausdehnung, so wird man Gleichstrom für Kraftwerk und Betrieb wählen, weil einmal der Wirkungsgrad der Bahnmotoren der günstigste ist und dann in der Hauptsache Pufferbatterien zur Unterstützung der Generatoren zur Verwendung kommen können. Namentlich der Straßenbahnbetrieb stellt die denkbar größten Anforderungen an das Kraftwerk, weil hier fast während der ganzen Betriebszeit dauernde, durch das augenblickliche Anfahren auf mehreren Punkten der Strecke hervorgerufene Stromschwankungen auftreten, die wirtschaftlich nur durch das gleichzeitige Parallelarbeiten von Pufferbatterien zu überwinden sind, wenn nicht die Generatoren selbst für unökonomisch große Leistungen gewählt werden. In Amerika verwendet man in der Mehrheit compoundierte Gleichstromgeneratoren, die gleichfalls einen rationellen Betrieb ermöglichen. Die Spannung am Fahrdrahte beträgt etwa 500 bis 750 Volt, richtet sich jedoch nach den ortsseits herrschenden behördlichen Vorschriften.

Soll dagegen die Bahn nicht nur innerhalb der Stadt, sondern auch nach Vororten verkehren, so findet als Stromart neben dem Gleichstrom auch Einphasen-Wechselstrom Anwendung, und zwar

so, daß etwa die Strecken im Stadtgebiete mit Gleichstrom niedriger Spannung und die außerhalb gelegenen mit hochgespanntem Wechselstrom betrieben werden. Jeder gut gebaute Einphasenmotor kann auch mit Gleichstrom gespeist werden. Erwähnt sei hier der von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft hergestellte Winter-Eichberg-Motor und die Einphasenmotoren der Siemens-Schuckert-Werke. Durch die Möglichkeit, heute auch Gleichstrom-Hochspannungsmotoren betriebssicher bauen zu können, wird sich hier erst auf Grund eines Vergleiches der beiden Systeme ermitteln lassen, welchem von beiden der Vorzug zu geben ist. Die Gleichstrommotoren haben ein geringeres Gewicht, als die Wechselstrommotoren, und die elektrische Ausrüstung der Fahrzeuge wird demnach weniger schwer, das dauernd mitzuführende tote Gewicht also kleiner. Dem gegenüber steht jedoch bei Gleichstrom der Nachteil, daß beim Anfahren durch das Vorschalten von Widerständen Energieverluste auftreten, die mit prozentual zunehmender Entfernung zwischen den einzelnen Haltepunkten abnehmen, während das Anfahren bei Wechselstrommotoren durch Transformierung der Spannung, also praktisch ohne Verluste erfolgt. In Berücksichtigung ist aber ferner auch die Betriebsführung selbst zu ziehen, wobei auf das bereits oben Erwähnte zurückzugreifen ist. Eine interessante Zusammenstellung über den Energieverbrauch bei beiden Stromarten hat R. M. Lincoln[1]) gemacht, die hier wiedergegeben werden soll.

	Gleichstrom	Einphasenstrom
Wagengewicht	35,0 t	41,3 t
Anzahl der Motoren	2	2
Leistung der Motoren	150 PS	165 PS
Übersetzungsverhältnis	1 : 2,4	1 : 3,2
Laufraddurchmesser	900 mm	900 mm
Motorspannung	550 Volt	200 Volt
Energieverbrauch	67,2 KW.	73,9 KW. am Motor oder bei $cos\ \varphi = 0,87$ 84,7 KVA.

[1]) Street Railway Journal 12. December 1903.

Nach den heutigen Ausführungen der Motoren ist der Unterschied im Gewichte derselben nicht mehr so bedeutend und beträgt etwa 10 Proz. Die Anlage- und Unterhaltungskosten werden für diesen Fall nicht wesentlich voneinander abweichen.

Für Überland- und Vollbahnen[1]) dagegen treten namentlich bei ausgedehnteren Anlagen die Vorzüge des Einphasen- und Dreiphasensystems stärker zu Tage und haben veranlaßt, daß man in der Mehrzahl zum Betriebe mittels dieser Stromarten übergegangen ist, unterstützt durch die Arbeiten, die sämtliche großen bahnbauenden Firmen der Ausgestaltung dieser Systeme und ihrer Betriebsmittel zugewendet haben. Im allgemeinen besitzen die letztgenannten Systeme den Vorteil gemeinsam, eine Spannung für Speise- und Arbeitsleitungen wählen zu können, die gestattet, mit den geringsten zulässigen Kupfermengen Energiemengen jeder gewünschten Größe auf weite Strecken wirtschaftlich zu übertragen, wodurch die Anlage- und Unterhaltungskosten wesentlich reduziert werden.

Diesem gemeinsamen Vorzuge stehen nun aber Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme an sich gegenüber, die prinzipieller Natur sind und ihnen gewissermaßen ihr Anwendungsgebiet zuweisen. So benötigt das Einphasen-Wechselstromsystem nur eine Kontaktleitung, ein Umstand, der es dem Gleichstromsystem nahe bringt, denn das für die Fahrleitungen aufzuwendende Kupfer ist das denkbar geringste, und die Masten, Isolatoren, Abspannvorrichtung, schließlich auch die Montage, Unterhaltungs- und Reparaturkosten gehen auf ein Mindestmaß zurück. Weiter gestatten die Motoren eine in jeder Beziehung ökonomische Geschwindigkeitsregulierung durch Transformierung der Motorspannung (vgl. zweites und drittes Kapitel), während die Motoren selbst, wie schon erwähnt, nicht nur in ihrem Gewichte, sondern auch in ihren Raumabmessungen größer ausfallen, als Drehstrommotoren gleicher Leistung. Es ist naturgemäß namentlich das Gewicht der elektrischen Ausrüstung für Bahnanlagen mit langen ebenen Strecken von nicht unwesentlicher Bedeutung. Ein weiterer Nachteil der Einphasenmotoren liegt in ihren hohen Tourenzahlen, die infolgedessen stets ein Zahnradvorgelege erforderlich

---

[1]) Vgl. Béla Valatin: Beförderung schwerer Eisenbahnzüge mit elektrischem Strom. E. B. u. B. 1905, Heft 26, 27, 28.

machen, wodurch wiederum der Wirkungsgrad herabgedrückt wird. Der bisherigen geringen Überlastungsfähigkeit der Motoren, die durch die Kommutierungsverhältnisse gegeben ist, sind die Siemens-Schuckert-Werke und die Maschinenfabrik Oerlikon dadurch begegnet, daß sie durch besondere Wickelungen zwischen den Hauptpolen der Motoren phasenverschobene Hilfsfelder erzeugen und durch diese Anordnung in vollkommener Weise ein funkenfreies Arbeiten sowohl beim Anfahren, wie auch bei jeder Belastung erreichen. Auch der Wirkungsgrad ist heute nahezu gleich dem gleichgroßer Gleichstrommotoren. Die Spannung für die Motoren selbst beträgt im allgemeinen 200 bis 450 Volt.

Dem Dreiphasen- oder Drehstromsystem steht, in analoger Reihenfolge behandelt, zunächst der Nachteil der doppelten Arbeitsleitung zur Seite, der dasselbe in bezug auf Einfachheit in der Linienführung, benötigtes Material, Montage, Anlage- und Unterhaltungskosten naturgemäß ganz erheblich beeinflußt. Dem gegenüber besitzt aber der Motor selbst Vorzüge, die ihn für bestimmte Bahnanlagen geeigneter erscheinen lassen, als den Wechselstrom-Kommutatormotor. So gestattet der Drehstrommotor auf Gefällen, oder aber bei Mehrmotorwagen durch die Kaskadenschaltung (vgl. viertes Kapitel), die Zurückgewinnung elektrischer Energie, ein Umstand, der ihn für ausgedehntere Bergbahnanlagen und bei beschränktem Kraftwerke zu dem geeigneteren macht. Das Gewicht und die Raumabmessungen werden, wie schon erwähnt, geringer, und die Motoren lassen sich für jede gewünschte Tourenzahl bauen, wodurch die Zwischenschaltung von Zahnrädern usw. in Fortfall kommt. Dagegen stehen sie den Einphasenmotoren in bezug auf leichte und wirtschaftliche Geschwindigkeitsregulierung nach, denn diese muß mit Hilfe von Energie verzehrenden Vorschaltwiderständen im Läuferstromkreise oder verwickelte Polumschaltungen [1]) vorgenommen werden.

Im allgemeinen läßt sich etwa kurz zusammenfassen: Das Wechselstrom-Einphasensystem wird bei Überland- und Vollbahnen mit in der Mehrheit ebenem Gelände in den Vordergrund

---

[1]) Vgl. Béla Valatin, Drehstromlokomotiven mit drei Geschwindigkeitsstufen der Italienischen Staatsbahnen von Gauz & Co. Budapest E. K. u. B. 1907, Heft 6.

treten, während das Drehstromsystem mehr für Bergbahnen mit der Bedingung der Energierückgewinnung in Frage kommt.

Für Grubenbahnen, gleislose Bahnen und Bahnen für industrielle Zwecke wird man fast ausnahmslos Gleichstrom wählen, der durch die Pfufferbatterien bei derartig kleinen Anlagen den Vorteil aufweist, nur während eines Teiles des Tages die Generatoren des Kraftwerkes in Betrieb zu halten, während dagegen die Stromlieferung bei schwacher Inanspruchnahme lediglich von der Batterie aus erfolgt.

Zweites Kapitel.

Die Bahnmotoren.

4. Anforderungen.

Der Bahnbetrieb mit seinen wechselnden Belastungs- und Geländeverhältnissen und dem damit verbundenen überaus schwankenden Kraftbedarf, sowie die Befestigungsart, also gewissermaßen der Aufstellungsort der Motoren, stellt an die elektrische und mechanische Ausführung derselben weit höhere Anforderungen, als dieses in der größten Zahl elektrischer Betriebe gewöhnlich der Fall ist. Die Motoren müssen infolgedessen nicht nur den allgemeinen Bestimmungen, sondern vorzugsweise auch gewissen Grundbedingungen genügen, um einerseits die für den Betrieb notwendige Sicherheit und andererseits eine den hohen Anschaffungskosten entsprechende Lebensdauer zu besitzen.

Als diese Grundbedingungen gelten im wesentlichen folgende:

a) In elektrischer Hinsicht:

1. hohes Anzugsmoment;
2. starke zeitweise Überlastungsfähigkeit ohne starke Funkenbildung und übermäßige Erwärmung der Wickelungen usw.;

3. die Erwärmung bei Dauerbetrieb und normaler Leistung darf vorgeschriebene bzw. als höchst zulässig erachtete Grenzen [1]) nicht überschreiten;
4. funkenloses Arbeiten in allen Schaltungen;
5. leichte und bequeme Schaltmöglichkeit in bezug auf Tourenregulierung, wechselnde Drehrichtung und Bremsung;
6. hoher Wirkungsgrad bzw. Leistungsfaktor.

b) In mechanischer Hinsicht:

1. geringe Raumabmessungen und geringes Gewicht;
2. staub- und wasserdichter Abschluß gegen äußere Einflüsse unbeschadet der Möglichkeit genügender Abkühlung;
3. leichte Zugänglichkeit zu allen Teilen;
4. Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Erschütterungen;
5. gute und dauerhafte Isolation.

Ferner bedingt der Charakter mancher Bahnanlage weiter als

c) wünschenswert:

1. das Anpassungsvermögen der Motoren in ihrer Geschwindigkeit und Zugkraft an die Gelände- und Belastungsverhältnisse;
2. möglichste Unabhängigkeit von Spannungsschwankungen.

Obgleich sich einzelne der angeführten Bedingungen widersprechen, so beispielsweise die Erwärmung der Motoren bei geringstem Gewichte, kleinster Raumabmessung und staub- und wasserdichtem Abschluß des Gehäuses gegen die umgebende Luft, so ist es dennoch erforderlich, denselben in weitgehendster Weise Rechnung zu tragen, um Betriebsstörungen infolge Motordefektes nach Möglichkeit zu vermeiden. Bei der Behandlung der einzelnen Motorsysteme soll auf verschiedene dieser Bedingungen näher eingegangen werden.

5. Die Gleichstrommotoren im allgemeinen.

Die ausgedehnteste Anwendung für Bahnzwecke haben bisher die Gleichstrommotoren gefunden, und zwar in erster Linie die

[1]) Vgl. Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren des V. D. E.

Hauptstrommotoren; nur vereinzelt wird auch der Nebenschlußmotor für Traktionszwecke herangezogen. Aus den folgenden für Gleichstrommotoren allgemein geltenden Gleichungen 2) bis 9) kann das elektrische Verhalten derselben in bezug auf die für Bahnzwecke in erster Linie interessierenden Größen, wie Tourenzahl, Drehmoment bzw. Zugkraft und Leistung, leicht erkannt werden.

Bezeichnet:

E_k die Klemmenspannung,
E_a die EMGK des Ankers oder induzierte EMK,
$J = J_a + i_n$ den aufgenommenen Strom,
  J_a Ankerstrom,
  i_n Strom im Nebenschluß,
N die Anzahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter,
$2p$ die Anzahl der Pole,
$2q$ die Anzahl der Ankerstromzweige,
n die Tourenzahl pro Minute,
$W_g = W_a + W_h + W_n$ den gesamten Widerstand,
  W_a Ankerwiderstand,
  W_h Widerstand der Hauptstromwickelung,
  W_n Widerstand der Nebenschlußwickelung,
D das Drehmoment,
$\mathfrak{Z}$ den wirksamen Kraftfluß (Kraftlinienmenge),

so ist die im Anker eines Motors induzierte EMK:

$$E_a = E_k - J\,W_g \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2\text{a)}$$

oder

$$E_a = \frac{p}{q}\cdot\frac{n}{60}\,.\,N\mathfrak{Z}\,.\,10^{-8}\ \text{Volt} \quad \ldots\ldots \quad 2\text{b)}$$

und die Tourenzahl

$$n = \frac{E_a\,.\,q\,.\,60\,.\,18^8}{N\,.\,\mathfrak{Z}\cdot p} \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

Das theoretische Drehmoment D_t ergibt sich aus der Leistung

$$D_t = \frac{E_a\,.\,J_a}{a} = \frac{p\,.\,N}{q\,.\,2\pi}\,J_a\,.\,\mathfrak{Z}\,10^{-8}\ \text{Volt} \quad \ldots \quad 4)$$

worin $a = \frac{2\pi n}{60}$ die Winkelgeschwindigkeit bedeutet.

Eine Reihe von Verlusten durch Reibung, Hysterese, Wirbelströme usw. bedingen jedoch, daß nur ein Teil von D_t nutzbar vom Motor ausgeübt wird, und zwar das praktische Drehmoment

$$D = g_m . D_t = \frac{g_m . p . N}{q . 2\pi} J_a . \mathfrak{Z}\, 10^{-8} \text{ Watt} \quad . \quad . \quad 5\text{a)}$$

oder in kgm ausgedrückt

$$D = \frac{g_m . p . N}{9{,}81 . 2\pi . q} J_a . \mathfrak{Z} . 10^{-8} \text{ kgm} \quad . \quad . \quad . \quad 5\text{b)}$$

worin das mechanische Güteverhältnis

$$g_m = \frac{E_a . J - \text{Verluste}}{E_a . J} < 1.$$

Aus dem Drehmoment folgt weiter die Zugkraft des Motors unter der Voraussetzung, daß dieselbe mittels eines Zahnradvorgeleges auf die Wagenachsen übertragen wird, zu

$$K = \eta_R . \frac{\varphi . D}{r} = \frac{\eta_R . g_m}{2\pi . 9{,}81} . \frac{p}{q} . \frac{\varphi . N}{r} J_a . \mathfrak{Z}\, 10^{-8} \quad . \quad 6)$$

$\eta_R = 0{,}9$ bis $0{,}95$ bezeichnet den Wirkungsgrad des Zahnradvorgeleges, φ das Übersetzungsverhältnis desselben:

$$\varphi = \frac{\text{Tourenzahl der Wagenachse}}{\text{Tourenzahl der Motorwelle}} = 1:4 \text{ bis } 1:5$$

und r den Halbmesser des Laufrades, etwa 0,35 bis 0,45 m für Motorwagen und 0,60 bis 0,80 m für Lokomotiven.

Die Geschwindigkeit des Triebwagens ist demnach

$$v = \frac{2 r . \pi\ n}{60 . \varphi} \text{ m/sec}$$

oder den praktischen Verhältnissen entsprechend:

$$v = 3{,}6 . \frac{2 r . \pi . n}{60 . \varphi} = 0{,}3768 \frac{r . n}{\varphi} \text{ km/St.} \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Aus Drehmoment D und Winkelgeschwindigkeit a folgt die Nutzleistung

$$P_n = D . a = \frac{g_m . p . N}{9{,}81 . 2\pi . q} . \frac{2\pi . n}{75 . 60} J_a \mathfrak{Z} . 10^{-8}$$

$$= \frac{g_m}{9{,}81 . 75 . 60} . \frac{p . N . n}{q} J_a . \mathfrak{Z} . 10^{-8} \quad . \quad . \quad 8\text{a)}$$

oder mit Berücksichtigung der Gleichung 6)

$$P_n = D \cdot a = 1{,}391 \frac{K \cdot r \cdot n}{\eta_B \cdot \varphi} \cdot 10^{-3} \text{ PS} \quad . \quad . \quad . \quad 8\text{b})$$

während die aufgewendete elektrische Leistung

$$P_1 = \frac{E_k \cdot J}{1000 \cdot \eta_M} \text{ KW} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9\text{a})$$

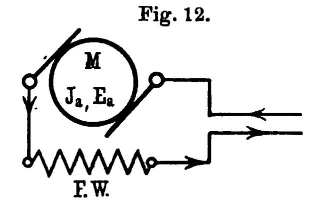
$$= \frac{E_k \cdot J}{736 \cdot \eta_M} \text{ PS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9\text{b})$$

An Hand der Gleichungen 2) bis 9) sollen nun die Eigentümlichkeiten der Hauptstrom- und Nebenschlußmotoren angegeben und ihre Brauchbarkeit für Bahnzwecke untersucht werden.

6. Der Hauptstrommotor.

Beim Hauptstrommotor liegen die Feldspulen in Reihe mit dem Anker (Fig. 12), werden also vom Ankerstrom J_a durchflossen. Hieraus erhellt ohne weiteres, daß die induzierte EMK E_a bzw. der wirksame Kraftfluß $\mathfrak{Z}$ vom Ankerstrom abhängig ist, somit

Fig. 12.



$$E_a = f(J) = f(J_a)$$

und

$$\mathfrak{Z} = f(J) = f(J_a),$$

denn es ist

$$J = J_a.$$

Aus Gleichung 2a) und 3) folgt die Tourenzahl

$$n = \frac{q \cdot 60 \cdot 10^8}{p \cdot N} \cdot \frac{E_k - J_a(W_a + W_h)}{\mathfrak{Z}} = const \frac{E_a}{\mathfrak{Z}} \quad . \quad 10)$$

Da der Kraftfluß $\mathfrak{Z}$ proportional mit zunehmendem Strome, also zunehmender Belastung steigt, so muß nach Gleichung 10) die Tourenzahl sinken.

Die Zugkraft K des Motors ergibt sich nach Gleichung 6) zu

$$K = const\, g_m \cdot J_a \cdot \mathfrak{Z} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

und wächst mit zunehmender Belastung. Kurz zusammengefaßt hat der Gleichstrom-Hauptstrommotor die Eigentümlichkeit, mit steigender Belastung an Geschwindigkeit ab- und an Zugkraft zuzunehmen. Ferner ist die Zugkraft, wenn man

von dem geringen Einflusse der Klemmenspannung auf das Güteverhältnis g_m und den Wirkungsgrad des Motors absieht, praktisch unabhängig von der Spannung in der Arbeitsleitung und lediglich abhängig von der jeweiligen Belastung, während die Tourenzahl mit abnehmender Spannung stark abnimmt. Das Anpassungsvermögen an die augenblicklichen Belastungsverhältnisse ist es, was den Hauptstrommotor zu dem bisher am häufigsten für Bahnzwecke verwendeten gemacht hat. In bezug auf seine Konstruktionsverhältnisse bietet er heute selbst für Spannungen bis 2000 Volt[1]) keinerlei Schwierigkeiten mehr, und seine Raumabmessungen, sowie Gewicht und Wirkungsgrad sind seiner Leistung entsprechend günstig.

Die aufzuwendende elektrische Leistung ist

$$P_1 = \frac{E_k \cdot J_a}{\eta_M} = [E_a + J_a(W_a + W_h)] J_a \text{ Watt} \quad . \quad . \quad 12)$$

und die an der Motorwelle nutzbar abgegebene mechanische Leistung

$$P_n = \frac{E_a \cdot J_a}{736} = \frac{[E_k - J_a(W_a + W_h)] J_a}{736} = \frac{E_k \cdot J_a}{736} \eta_M \text{ PS} \quad 13)$$

worin $\eta_M = 0{,}80$ bis $0{,}90$ den Gesamtwirkungsgrad des Motors bezeichnet.

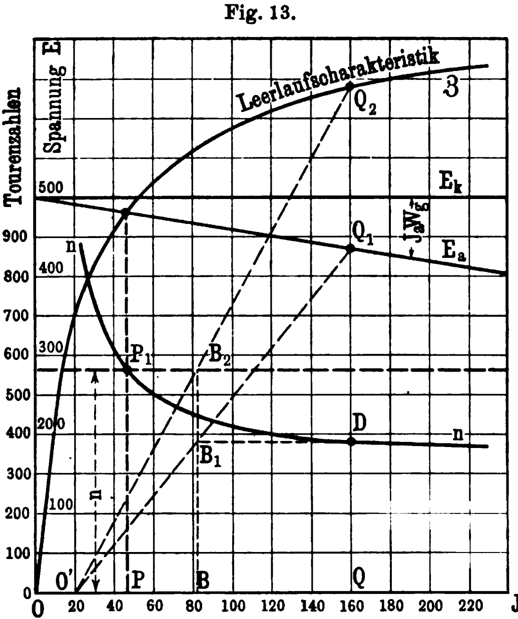
Mit Hilfe der Gleichungen 10) und 11) kann nun die jeder Belastung entsprechende Tourenzahl und Zugkraft berechnet werden. Da jedoch der Zusammenhang zwischen n und K nicht nur zur Aufstellung des Fahrplanes (vgl. fünftes Kapitel), sondern überhaupt für jeden Punkt der Strecke zur richtigen Bearbeitung eines Projektes ohne umständliche Rechnung bestimmbar sein muß, so empfiehlt es sich, die einzelnen Größen durch Kurven darzustellen. Zur Ermittelung derselben geht man am zweckmäßigsten von der Magnetisierungskurve oder Leerlaufscharakteristik aus, die entweder für eine bestimmte Tourenzahl berechnet oder bei konstanter Tourenzahl im Prüffelde aufgenommen ist, und bestimmt durch folgendes graphische Verfahren die interessierenden Kurven.

---

[1]) Neuerdings werden von den Siemens-Schuckert-Werken und der Aktiengesellschaft vorm. J. J. Rieter & Co. in Winterthur Gleichstrom-Hauptstrommotoren für Spannungen bis 2000 Volt gebaut, vgl. Fußnote auf S. 16 und E. B. u. B. 1905, Heft 27, S. 518.

Man trägt in ein rechtwinkeliges Koordinatensystem als Ordinaten die Spannungen und als Abszissen die Stromstärken in passendem Maßstabe auf und zeichnet die Leerlaufscharakteristik ein (Fig. 13). Unter der Annahme, daß die Klemmenspannung E_k konstant ist, wird diese dargestellt durch eine zur Abszissenachse parallele Gerade; desgleichen wird die im Anker induzierte

Fig. 13.



EMK E_a eine Gerade, die unter einem Winkel α so gegen E_k geneigt ist, daß

$$tg\,\alpha = \frac{J_a \,.\, W_g}{J_a} = W_g.$$

Die zwischen E_k und E_a liegenden Ordinatenabschnitte geben dann den dem jeweiligen Motorstrom entsprechenden Spannungsabfall $J_a \,.\, W_g$ an.

Aus der Leerlaufscharakteristik läßt sich nun die Tourenzahlkurve wie folgt konstruieren. Ist $PP_1 = n$ die bekannte Tourenzahl, für die die Leerlaufscharakteristik bestimmt ist, so folgt aus der Beziehung (Gleichung 10), daß

$$n = const\ \frac{E_a}{\mathfrak{Z}} = 1,$$

$$n_1 = const\ \frac{E_{a_1}}{\mathfrak{Z}_1},$$

sich verhält

$$n_1 : n = \frac{E_{a_1}}{\mathfrak{Z}_1} : \frac{E_a}{\mathfrak{Z}}$$

oder es ist

$$n_1 = n \cdot \frac{E_{a_1}}{\mathfrak{Z}_1}.$$

Zieht man von einem beliebigen Punkte der Abszissenachse O' Strahlen $O'Q_1$ und $O'Q_2$ an entsprechende Punkte der E_a- und $\mathfrak{Z}$-Kurve, projiziert den Schnittpunkt B_2 von $O'Q_2$ mit einer durch P_1 gelegten Parallelen zur Abszissenachse auf $O'Q_1$ und legt eine Parallele zu $P_1 B_2$ durch B_1 bis zum Schnittpunkte mit der Senkrechten durch $Q_1 Q_2$, so gibt der so gefundene Punkt D den gesuchten Punkt der Tourenzahlkurve, denn es ist

$$\frac{BB_1}{BB_2} = \frac{QD}{PP_1} = \frac{n_1}{n}$$

und

$$\frac{QQ_1}{QQ_2} = \frac{E_{a_1}}{\mathfrak{Z}_1},$$

demnach

$$QD = PP_1 \cdot \frac{QQ_1}{QQ_2} = n \frac{E_{a_1}}{\mathfrak{Z}_1}.$$

Durch Wiederholung dieses Verfahrens für verschiedene Punkte der Leerlaufscharakteristik wird dann die Tourenzahlkurve (nn-Kurve) gefunden. Multipliziert man den Ordinatenmaßstab mit $0{,}3768\ \frac{r}{\varphi}$, so erhält man die Geschwindigkeitskurve ($v\,v$) (Fig. 14) des Triebwagens. Ist hingegen die nn-Kurve gegeben, so kann durch einfache Umkehr des Verfahrens die zur Bestimmung der Drehmomentkurve erforderliche Leerlaufscharakteristik konstruiert werden.

Aus Gleichung 5) geht hervor, daß das Drehmoment D des Motors proportional ist dem Produkt aus Strom J_a und Kraftlinienmenge $\mathfrak{Z}$, also

$$D = const\ J_a \cdot \mathfrak{Z}$$

oder da bei konstanter Tourenzahl

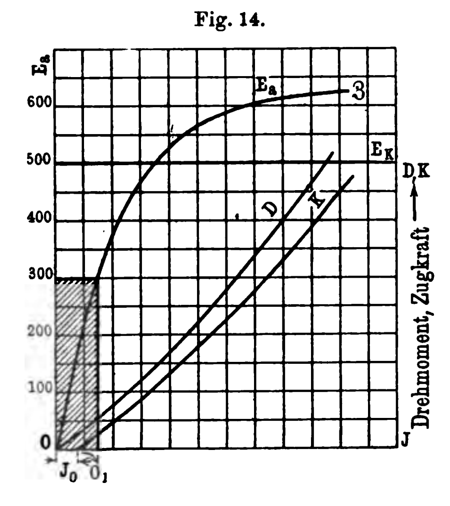
$$\mathfrak{Z} = const\ E_a,$$

so ist auch

$$D = const\ J_a \cdot E_a$$

und kann mit Hilfe der Magnetisierungskurve leicht ermittelt werden, denn es ist D gleich dem Inhalte des schraffierten Rechteckes (Fig. 14), dessen Seiten E_a bzw. $\mathfrak{Z}$ und J_a sind. Trägt man die gefundenen Werte in einer Kurve auf, so erhält man in Fig. 14 die Drehmomentkurve D, die im Koordinatenursprunge O beginnt.

Fig. 14.

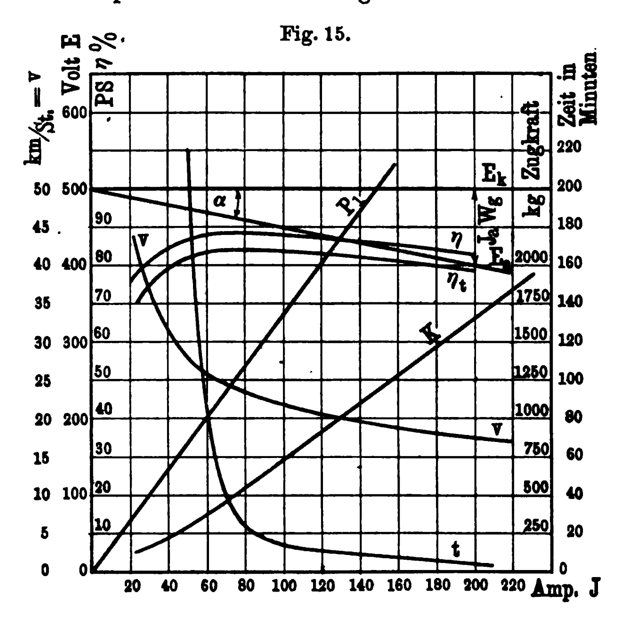


Um hieraus die Zugkraftkurve K zu bestimmen, ist der Ordinatenmaßstab mit $\eta_R \frac{\varphi}{r}$ zu multiplizieren. Letztere beginnt jedoch nicht im Punkte O, sondern in O_1 entsprechend einem Leerlaufstrome J_0, der durch Lagerreibung usw. bedingt ist. Die Kurve für die aufgewendete elektrische Leistung P_1 in PS ist eine Gerade, deren Abszissen den Stromstärken und deren Ordinaten der Leistung entsprechen. Der Ordinatenmaßstab wird durch $\frac{E_k \cdot J_a}{736\ \eta_M}$ gebildet.

Bei Betrachtung der einzelnen Kurven, die in Fig. 15 zusammengestellt sind und die charakteristischen Kurven des

Motors genannt werden, ergibt sich für die v-Kurve, daß die Geschwindigkeit bei Entlastung rasch unzulässig hohe Werte erreicht und bei Leerlauf theoretisch unendlich groß wird, der Motor also bei Leerlauf „durchgeht". Bei Bahnmotoren ist nun ein Durchgehen, also ein völliger Leerlauf nicht möglich, weil ja stets wenigstens das Eigengewicht des Triebwagens bewegt werden muß. Aber auch die Geschwindigkeit Null wird praktisch nicht erreicht, der Motor nimmt vielmehr eine der augenblicklichen Zugkraft entsprechende Geschwindigkeit an. Er hat also das

Fig. 15.



Bestreben, ein hohes Anzugsmoment zu entwickeln, was besonders für Bahnbetrieb von hervorragender Bedeutung ist und schon Eingangs als eine der wichtigsten Hauptbedingungen gefordert wurde.

In das Motordiagramm (Fig. 15) sind weiter die Wirkungsgradkurven mit und ohne Zahnradübersetzung, sowie die Zeitkurve t für die zulässige Erwärmung aufgenommen. Die Zeitkurve gibt an, wieviel Minuten der Motor bei einer bestimmten Stromstärke laufen darf, ohne die zulässige Erwärmungsgrenze

von 75° C zu überschreiten. Die t-Kurve wird im Prüffelde ermittelt [1]).

Fig. 16a und b stellt einen betriebsfertigen Straßenbahnmotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft dar und gibt ein Bild für die mechanische Ausführung derselben.

Fig. 16 a.



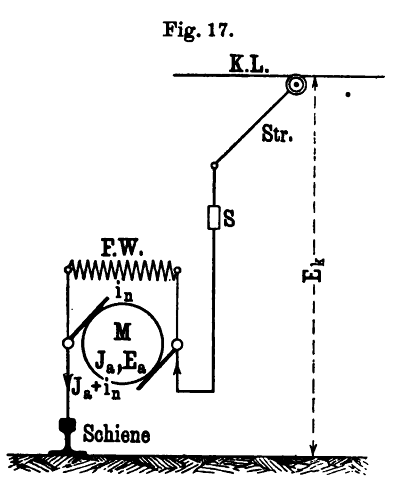
Fig. 16 b.

[1]) Berechnung derselben siehe Müller-Mattersdorf: „Die Bahnmotoren", 1903, S. 65 ff.

7. Der Nebenschlußmotor.

Ein wesentlich anderes Verhalten in bezug auf Tourenzahl und Zugkraft zeigt der Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Wie aus Fig. 17 ersichtlich, liegen die Feldspulen im Nebenschluß zum Anker, sind also direkt zwischen Fahrdraht und Schiene geschaltet. Der in den Feldwindungen fließende Strom i_n ist somit nur von dem Widerstande der Feldwindungen abhängig und kann mit hinreichender Genauigkeit als konstant angesehen werden. Ist die Klemmenspannung, also die Spannung am Fahrdraht, konstant, so ist auch i_n und infolgedessen die von diesem erzeugte Kraftlinienmenge $\mathfrak{Z} = f(i_n) = const.$ Das gleiche gilt von der im Anker induzierten EMK E_a, da $E_a = f(i_n)$.

Fig. 17.



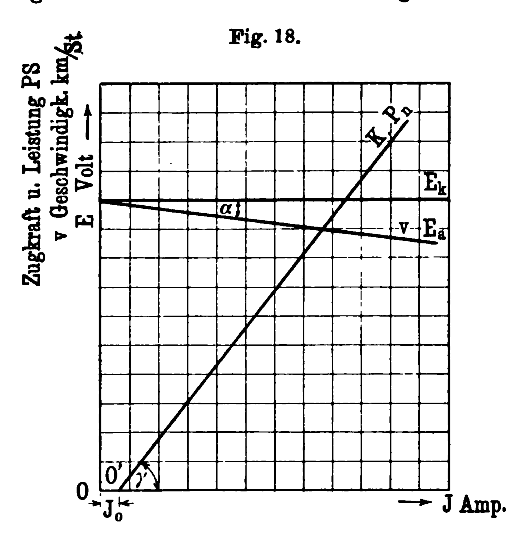
Die Tourenzahl n folgt aus Gleichung 3)

$$n = \frac{q \cdot 60 \cdot 10^8}{p \cdot N \cdot \mathfrak{Z}} (E_k - J_a W_a) = const\, E_a \quad . \quad . \quad 14)$$

und ist somit, wenn E_k konstant ist, für alle Belastungen die gleiche, da in Gleichung 14) das Glied $J_a W_a$ vernachlässigbar klein ist. Der Nebenschlußmotor wird also bei allen Belastungsverhältnissen mit annähernd unveränderter Geschwindigkeit laufen, so beispielsweise auch auf starken Steigungen, wodurch zwar die Fahrzeit abgekürzt wird, der Stromverbrauch jedoch namentlich dann, wenn die Wagen voll besetzt sind, ein außerordentlich hoher werden kann. Es ist demzufolge die Betriebsführung mit derartigen Motoren auf Bahnen üblicher Beschaffenheit, d. h. solchen, bei denen das Bahnniveau keinen ausgesprochenen Bergcharakter trägt, im allgemeinen nicht wirtschaftlich, wie eine leichte Rechnung beweisen kann. Denn der durch die Verkürzung der Fahrzeit insbesondere auf starken

Steigungen erzielte Vorteil steht in keinem ökonomischen Verhältnis zu dem Energieverbrauch, den die Wagen in diesem Falle erfordern, abgesehen von der zu wählenden Motorgröße (vgl. viertes Kapitel). Aber auch die Ausnutzung des Kraftwerkes ist eine unwirtschaftliche, worauf jedoch erst später näher eingegangen werden soll. Für eine sichere Einhaltung des Fahrplanes (vgl. fünftes Kapitel) ist allerdings die gleichbleibende Geschwindigkeit von annehmbarer Bedeutung.

Fig. 18.



Aber nicht allein in der Tourenzahl, sondern auch in dem vom Motor ausgeübten Drehmoment ist der Nebenschlußmotor dem Hauptstrommotor gegenüber im Nachteil.

Nach Gleichung 5) war das Drehmoment

$$D = \frac{g_m \cdot p \cdot N \cdot 10^{-8}}{9{,}81 \cdot 2\pi \cdot q} J_a \cdot \mathfrak{Z}$$

und wird hier somit

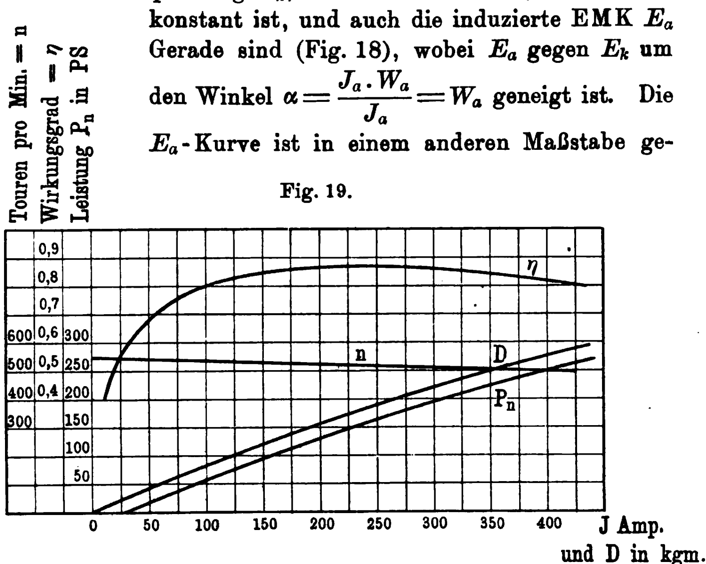
$$D = const \cdot J_a \cdot \mathfrak{Z} \quad \ldots \ldots \quad 15)$$

woraus folgt, daß, wenn $\mathfrak{Z}$, also E_k konstant ist, das Drehmoment einmal von der Belastung abhängt, in hohem Maße weiter aber auch von der Klemmenspannung beeinflußt wird, denn es ist $\mathfrak{Z} = f(E_k)$. Es haben also Spannungsschwankungen, wie

sie namentlich beim Straßenbahnbetriebe durch die dauernden und oft recht erheblichen Belastungsänderungen hervorgerufen werden, auf das Drehmoment bzw. die Zugkraft der Motoren bedeutenden Einfluß.

Für die diagrammatische Darstellung der einzelnen Größen wie v, K usw. folgt aus den Gleichungen 14) und 15) wiederum unter Zugrundelegung eines rechtwinkligen Koordinatensystems, daß die Klemmenspannung E_k, unter der Annahme, daß dieselbe konstant ist, und auch die induzierte EMK E_a Gerade sind (Fig. 18), wobei E_a gegen E_k um den Winkel $\alpha = \frac{J_a \cdot W_a}{J_a} = W_a$ geneigt ist. Die E_a-Kurve ist in einem anderen Maßstabe ge-

Fig. 19.



messen gleichzeitig auch die Tourenzahlkurve n bzw. Geschwindigkeitskurve v. Die Zugkraftkurve K läßt sich mit hinreichender Genauigkeit gleichfalls durch eine Gerade darstellen, die mit der Abszissenachse einen Winkel γ einschließt, derart, daß

$$tg\,\gamma = \frac{g_m \cdot p \cdot N \cdot 10^{-8}}{9{,}81 \cdot 2\pi \cdot q}\,\mathfrak{Z},$$

wobei jedoch auch hier zu berücksichtigen ist, daß die K-Kurve aus dem nämlichen Grunde, wie beim Hauptstrommotor, nicht im Koordinatenursprung beginnt.

Da infolge der hohen Ankerstromstärke im Augenblicke des Anfahrens, bedingt durch die für die Beschleunigung erforderliche

Zugkraft ein bedeutender Spannungsabfall in der Zuleitung eintritt, so wird der wirksame Kraftfluß oder die Kraftlinienmenge zunächst stark geschwächt. Infolgedessen ist auch die Anfahrzugkraft eine verminderte.

Allen diesen Nachteilen gegenüber steht der Vorteil, daß die Nebenschlußmotoren als Generatoren in gleicher Drehrichtung laufen und bei Überschreitung der normalen Tourenzahl stromliefernd wirken. Es ist dieses bei Bergbahnen von wesentlicher Bedeutung, weil der durch die Motoren der talwärts fahrenden Wagen erzeugte Strom das Kraftwerk in seiner Stromlieferung unterstützt. In Fig. 19 sind die charakteristischen Kurven eines normalen Nebenschlußmotors für Traktionszwecke dargestellt, die ohne Erklärung einen vollständigen Einblick in die Verhältnisse derselben für alle interessierenden Vorgänge gestatten.

8. Die Wechselstrommotoren im allgemeinen.

Die sich mehr und mehr fühlbar machende Notwendigkeit, den elektrischen Bahnbetrieb auf weite Strecken auszudehnen, namentlich aber auch der Wunsch, denselben auf Vollbahnen zur Anwendung zu bringen, hat die Durchbildung des Wechsel- und Drehstrommotors für Traktionszwecke erforderlich gemacht, weil man bei Wahl dieser Stromarten bequem in der Lage ist, Hochspannung für Speise- und Arbeitsleitungen zu benutzen. Es soll daher in Nachstehendem auch über diese Motoren das Erforderliche gesagt werden.

Von den Wechselstrom-Einphasenmotoren sind nur die Kollektormotoren für Bahnzwecke geeignet und zwar in der Hauptsache:

1. der Repulsionsmotor,
2. der Reihenschlußmotor,
3. der kompensierte Reihenschlußmotor,

während die Induktionsmotoren infolge ihres elektrischen Aufbaues einen Anlauf unter Last, wie er für Bahnmotoren gefordert werden muß, entweder gar nicht, oder nur unter Anwendung verwickelter Schaltungen und Hilfsapparate, wie Drosselspulen, Kondensatoren usw. gestatten. Das Gemeinschaftliche der erstgenannten Motortypen besteht in der Verwendung eines gewöhnlichen Gleichstromankers mit Kollektor und Bürsten; in ihrer

Wirkungsweise und konstruktiven Ausführung zeigen sie dagegen wesentliche Unterschiede.

9. Der Repulsionsmotor.

Dieser Motor ist zuerst von Elihu Thomson 1899 angegeben worden; seine Wirkungsweise beruht im Prinzip darauf, daß eine kurzgeschlossene Spule in ein von dem zugeführten Strome (primären Strome) J_1 erzeugtes Feld gebracht wird. In derselben wird dann ein sekundärer Strom J_2 induziert, der gegenüber J_1 um nahezu 180°, oder dessen magnetisches Feld $\mathfrak{B}_2$ gegen das primäre um nahezu 180° phasenverschoben ist. Die Spule würde infolgedessen abgestoßen werden, wenn sie nicht auf der Achse A befestigt wäre (Fig. 20). So kann sie sich nur

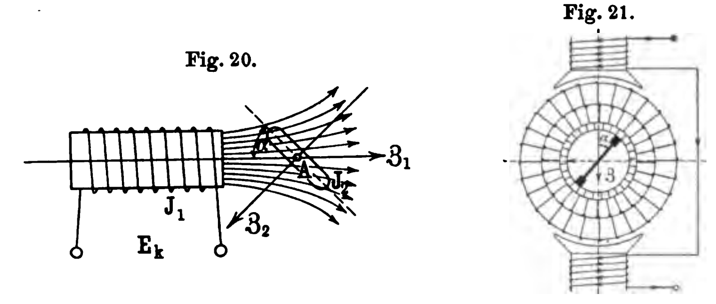


Fig. 20. Fig. 21.

drehen und führt die Drehung auch aus, bis sie parallel zu den Kraftlinien des primären Feldes $\mathfrak{B}_1$ steht. In dieser Stellung wird kein Strom mehr in der Spule induziert und das Feld $\mathfrak{B}_2$ verschwindet. Bringt man nun stets neue kurzgeschlossene Spulen zur Wirkung, so erhält man eine fortdauernde Drehung des Spulensystems. Praktisch wird dieses durch Anwendung eines Gleichstromankers mit Kollektor erreicht und der Kurzschluß durch zwei um 180° versetzte, leitend miteinander verbundene Bürsten bewirkt (Fig. 21). Die elektrischen Vorgänge in einem solchen mit Wechselstrom betriebenen Motor sind kurz folgende:

Bei stillstehendem Anker wird durch den Magnetisierungsstrom J_m in der Magnetwickelung das Hauptfeld $\mathfrak{B}_1$ erzeugt. Die durch die Bürsten kurzgeschlossene Ankerwickelung steht zu ersterer in dem gleichen Verhältnis, wie die sekundären Windungen eines Transformators zu den primären; es wird somit

in der Ankerwickelung ein Kurzschlußstrom J_k fließen. Zerlegt man das Hauptfeld $\mathfrak{Z}_1$ in zwei Komponenten, eine in der Richtung der Bürsten $\mathfrak{Z}_1 \cos\alpha$ und eine senkrecht zum Hauptfelde $\mathfrak{Z}_1 \sin\alpha$, wenn α den Winkel zwischen dem Felde $\mathfrak{Z}_1$ und der Bürstenrichtung angibt, so wird $\mathfrak{Z}_1 \cos\alpha$ durch die Ankerwickelung kompensiert, während $\mathfrak{Z}_1 \sin\alpha$ das eigentliche Magnetfeld bildet. Beginnt sich der Anker zu drehen, so wird durch $\mathfrak{Z}_1 \sin\alpha$ eine EMK E_1 in der Magnetwickelung induziert, die gegenüber dem Felde um 90° phasennacheilend ist und, da Feld und Strom J_1 in Phase miteinander sind, auch gegenüber J_1, ferner eine EMK E_2 in der Ankerwickelung, die infolge des Kurzschlusses gleich ist

$$E_2 = J_2 \sqrt{w_2^2 + x_2^2},$$

wenn w_2 den Ohmschen Widerstand und x_2 den induktiven Widerstand der Ankerwickelung bezeichnet. Durch Rotation des Ankers in $\mathfrak{Z}_1 \sin\alpha$ wird weiter eine EMGK E_a in der Ankerwickelung induziert, die der EMGK eines Gleichstromankers entspricht. E_a ist seiner Größe nach abhängig von der Geschwindigkeit, variiert aber nach der gleichen Funktion, nach der das Feld, also J_1 variiert und ist somit in Phase mit J_1. Die EMGK hat einen Strom J_2 zur Folge, der mit zunehmendem E_a, also steigender Tourenzahl, abnimmt und proportional der Belastung ist. Dieser Ankerstrom erzeugt ein Feld in der Bürstenrichtung, das der Belastung des Motors entspricht.

Es ist also die im Anker induzierte EMK

$$E_a = 4{,}44\, k\, \frac{p \cdot n}{60} N_2 \cdot \mathfrak{Z}_1 \sin\alpha\, 10^{-8}\, \text{Volt} \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

$$= const\, n \cdot \mathfrak{Z}_1 \sin\alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16\text{a})$$

worin k einen Faktor abhängig von der Wickelung bezeichnet, und die Tourenzahl

$$n = \frac{E_a}{const \cdot \mathfrak{Z}_1 \sin\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

Da der wirksame Kraftfluß $\mathfrak{Z}_1$ proportional J_1 ist und mit steigender Belastung wächst, wird nach Gleichung 17) die Tourenzahl abnehmen.

Das Drehmoment

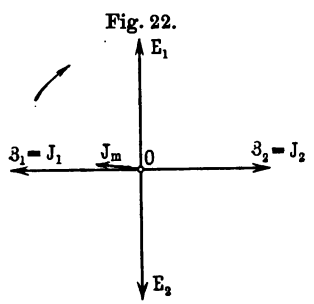
$$D = const \cdot J_2 \cdot \mathfrak{Z}_1 \sin\alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 18)$$

ist proportional der Belastung und steigt mit abnehmender Geschwindigkeit, da J_2 in diesem Falle zunimmt.

Da Ankerstrom und Feld in Phase sind, wie das Diagramm (Fig. 22) zeigt, ist das Anzugsmoment ein kräftiges.

Der Repulsionsmotor gleicht also einem Gleichstrom-Hauptstrommotor; er hat den Vorteil, daß infolge der konstruktiven Unabhängigkeit von Magnet- und Ankerwickelung für die ruhende Magnetwickelung hohe Spannungen gewählt werden können. Die Durchbildung des Kommutators macht jedoch infolge des hohen Kurzschlußstromes, den derselbe zu führen hat, und dadurch, daß das Feld $\mathfrak{Z}_1$ ein Wechselfeld ist, bedeutende Schwierigkeiten. Praktische Verwendung hat diese Motortype hauptsächlich in Amerika gefunden.

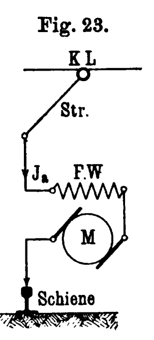
Fig. 22.



10. Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

Derselbe ist sowohl in seiner Schaltung, wie auch in seiner Wirkungsweise bei Belastungsänderungen einem Gleichstrom-Hauptstrommotor ähnlich und unterscheidet sich im wesentlichen nur dadurch von ihm, daß er lamellierte Magnete besitzt. Auch hier liegen die Feldspulen in Reihe mit dem Anker, werden also vom Ankerstrom J_a durchflossen (Fig. 23). Die Erregung bzw. der wirksame Kraftfluß $\mathfrak{Z}$ ist von J_a und somit von der Belastung abhängig. J_a und $\mathfrak{Z}$ sind infolgedessen stets in Phase miteinander, und das Drehmoment D hat seinen maximalen Wert.

Fig. 23.

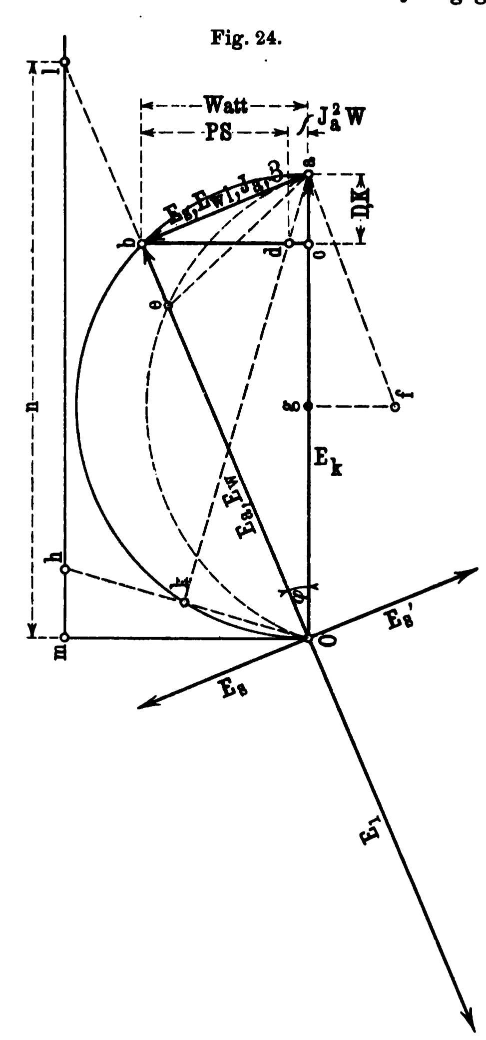


Das von den Erregeramperewindungen erzeugte Feld $\mathfrak{Z}$ ist ein Wechselfeld und induziert einmal in der sich drehenden Ankerwickelung eine Gegen-EMK E_a, die analog der Gegen-EMK eines Gleichstrommotors ist, und ferner durch die Pulsation des Wechselstromes eine EMK der Selbstinduktion E_s im Anker. E_a ist seiner Größe nach abhängig von der Tourenzahl, denn es ist

$$E_a = 4{,}44\, k \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot N \cdot \mathfrak{Z}\, 10^{-8} \text{ Volt} = const. n . \mathfrak{Z} \quad . \quad . \quad 19)$$

dagegen von gleicher Funktion, wie J_a, und also in Phase mit J_a. Die EMK der Selbstinduktion E_s ist gegenüber E_a um 90° phasenverzögert. Durch das Wechselfeld werden aber weiter elektromotorische Kräfte in der Ankerwickelung und den jeweils durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen induziert, die jedoch keinen Strom hervorrufen können, da sie sich in ihrer Wirkungsweise gegenseitig aufheben.

Fig. 24.



Das von der Ankerwickelung erzeugte Feld ist naturgemäß gleichfalls ein Wechselfeld und steht senkrecht zum Erregerfelde, wenn die Bürsten in der neutralen Zone stehen. Letzteres ist bei allen Bahnmotoren Bedingung, weil dieselben ohne Bürstenverstellung praktisch funkenlos vorwärts und rückwärts laufen müssen. Das Ankerfeld bewirkt eine Verzerrung und Schwächung des Erregerfeldes, welche Wirkung man kurz mit „Ankerrückwirkung“ bezeichnet. Den elektromotorischen Kräften E_a und E_s müssen zwei gleich große elektromotorische Kräfte E_2 und E_s' in der Magnetwickelung das Gleichgewicht halten, die also gegen-

über E_a und E_s 180° Phasenabstand haben. Die Klemmenspannung E_k ist die Resultante von E_a und E_s und bildet mit dem Strome J_a den Phasenverschiebungswinkel φ.

Die diagrammatische Darstellung der einzelnen Größen wird durch Fig. 24 veranschaulicht. Zur weiteren Entwickelung der interessierenden Größen, wie Leistung, Drehmoment und Tourenzahl und zur leichteren Erkenntnis ihrer Abhängigkeit untereinander soll das von Heubach angegebene Verfahren[1]) benutzt werden[2]).

Man zerlegt die Klemmenspannung E_k in ihre beiden Komponenten (Fig. 24), die Wattkomponente E_w und die wattlose Komponente E_{wl}, indem man über E_k als Durchmesser einen Halbkreis beschreibt und E_w und den Phasenverschiebungswinkel φ einträgt. Die EMK der Selbstinduktion ist direkt proportional dem Strome J_a und somit auch dem mit letzterem übereinstimmenden wirksamen Kraftflusse $\mathfrak{Z}$.

Es gilt infolgedessen

$$E_w = E_a = E_k \cos\varphi = \overline{Ob}$$
$$E_{wl} \equiv J_a \equiv \mathfrak{Z} = E_k \sin\varphi = \overline{ab},$$

worin das Zeichen $\equiv$ identisch bedeutet.

Die dem Motor zugeführte elektrische Leistung in Watt ist

$$P_1 = E_k J_a \cos\varphi = E_w . J_a \equiv \overline{Ob} . \overline{ab} \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

also proportional dem doppelten Flächeninhalte des rechtwinkligen Dreiecks Oab. Da die Höhe $\overline{bc}$ des Dreiecks gleich seiner Fläche ist, so gibt $\overline{bc}$ in einem bestimmten Maßstabe gemessen die Leistung P_1 an.

Die vom Motor abgegebene Nutzleistung P_n ohne Berücksichtigung der Zahnradübersetzung ergibt sich aus Gleichung 20) zu

$$P_n = \frac{E_k J_a \cos\varphi - J_a^2 (W_a + W_h)}{736} \eta_M$$
$$= const \, [E_w J_a - J_a^2 (W_a + W_h)] \quad . \quad . \quad . \quad 21)$$

---

[1]) Vgl. Heubach: Der Wechselstrom-Seriemotor.

[2]) Über die Aufstellung des Diagramms an und für sich vgl. Band V der Einzeldarstellungen: Dr. Benischke, Die asynchronen Drehstrommotoren.

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke Oab und bac folgt die Proportion:

$$\frac{\overline{Oa}}{\overline{ab}} = \frac{\overline{ab}}{\overline{ac}}$$

oder

$$\overline{Oa} \, . \, \overline{ac} = \overline{ab}^2$$

und unter der Annahme, daß die Klemmenspannung $E_k = \overline{Oa}$ konstant ist, ist

$$\overline{ac} \equiv \overline{ab}^2 \equiv J_a^2.$$

Wählt man nun auf der Strecke $\overline{bc}$ einen Punkt d so, daß $\overline{cd}$ den Wattverlust im Motor in passendem Maßstabe darstellt, so ist

$$tg\, c\, a\, d = \frac{\overline{cd}}{\overline{ac}} \equiv \frac{J_a^2 \,(W_a + W_h)}{J_a^2} = (W_a + W_h) = W_g$$

und die Strecke $\overline{bd}$ gibt in entsprechendem Maßstabe die Nutzleistung des Motors an, also

$$\overline{bd} \equiv P_n \equiv const \, [E_w \, . \, J_a - J_a^2 \, . \, W_g].$$

Das **Drehmoment** kann folgendermaßen gefunden werden. Unter der Voraussetzung sinoidalen Stromes ist die im Anker induzierte EMK nach Gleichung 19)

$$E_a = 4{,}44 \, k \, . \, c \, . \, N \, . \, \mathfrak{Z} \, 10^{-8} \text{ Volt},$$

worin $c = \frac{p \, . \, n}{60}$ die Periodenzahl des zugeführten Stromes bezeichnet, und es ist das praktische Drehmoment somit

$$D = \frac{4{,}44 \, . \, k \, . \, g_m \cdot \frac{p \, . \, n}{60} \cdot N}{9{,}81 \, . \, 2\pi \cdot \frac{n}{60} \, 10^8} \, \mathfrak{Z} \cdot J_a = const \, . \, \mathfrak{Z} \cdot J_a \quad . \quad 22)$$

also übereinstimmend mit dem Gleichstrom-Hauptstrommotor proportional dem wirksamen Kraftflusse $\mathfrak{Z}$ und dem Ankerstrome J_a. Da, wie aus obigem hervorgeht, $\mathfrak{Z}$ und J_a stets in Phase sind, so hat D den größten erreichbaren Wert auch in bezug auf das Anzugsmoment. Im Diagramm ist

$$D \equiv \overline{ab}^2 \equiv \overline{ac}$$

und die Zugkraft

$$K = \frac{\eta_B \cdot \varphi}{r} D \equiv const\ \overline{ac}.$$

Die Tourenzahl n schließlich findet man aus der Beziehung, daß

$$E_a = E_w = const . n . \mathfrak{Z}$$

oder

$$n \equiv \frac{E_w}{\mathfrak{Z}} \equiv \frac{E_k \cos \varphi}{E_k \sin \varphi} = cotg\ \varphi .$$

Zieht man in beliebigem Abstande eine Parallele zu $\overline{Oa}$, so ist

$$\measuredangle\ Olm = \varphi$$

und somit

$$cotg\ \varphi = \frac{\overline{lm}}{\overline{Om}},$$

oder, da $\overline{Om} = const$ ist, folgt

$$n \equiv \overline{ml}.$$

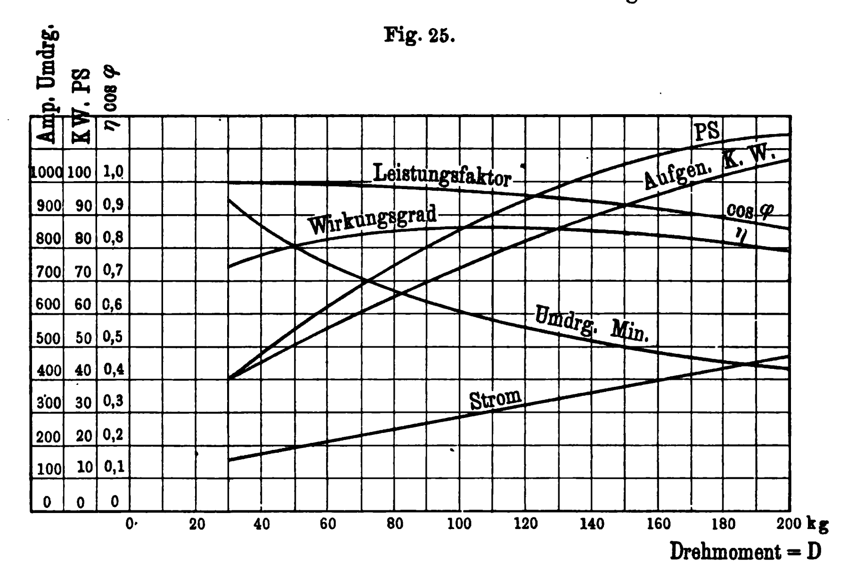
Wählt man ferner auf der Strecke $\overline{Ob} = E_a = E_w$ einen Punkt e so, daß $\overline{be}$ gleich ist dem Spannungsabfall im Motor, so zerlegt sich E_w in zwei Teile, einen $\overline{Oe}$ proportional der EMGK des Ankers und einen zweiten $\overline{eb}$ gleich dem Spannungsabfall im Motor. Der Punkt b durchläuft alle Werte auf dem Halbkreise Oa und entsprechend bewegt sich auch e auf einem Halbkreise, dessen Mittelpunkt gegeben ist durch

$$tg\ agf = \frac{\overline{gf}}{\overline{ga}} \equiv W_g.$$

Mit Hilfe des Diagrammes kann das gegenseitige Verhalten von E_a, P_1, P_n, n und D bzw. K leicht erkannt und bei Wahl geeigneter Maßstäbe die Verzeichnung der charakteristischen Kurven vorgenommen werden. Im allgemeinen gelten die Erklärungen, die für den Gleichstrom-Hauptstrommotor gegeben wurden, sinngemäß auch für den Wechselstrom-Reihenschlußmotor. Fig. 25 zeigt die Kurven eines betriebsfertigen Motors, die ohne Schwierigkeit das Verhalten desselben hinsichtlich Zugkraft, Tourenzahl, Wirkungsgrad usw. bei Belastungsänderungen erkennen lassen.

Die Eingangs gestellten Grundbedingungen sind Dank der großen Mühe, der sich die bahnbauenden Elektrizitätsfirmen für eine zweckmäßige Durchbildung gerade dieser Motortype unterzogen haben, im allgemeinen als vollständig erfüllt anzusehen. Eine der Hauptschwierigkeiten, die funkenlose Kommutierung, die hier dadurch erschwert wird, daß die Bürsten neben dem Belastungsstrome auch noch den Kurzschlußstrom zu führen haben, wird, wie vorher erläutert, bei den von der Maschinenfabrik Oerlikon und den Siemens-Schuckert-Werken gebauten Mo-

Fig. 25.



toren dadurch erreicht, daß besondere Hilfswickelungen am feststehenden Teile des Motors eingebaut werden, die besondere Hilfsbürsten entbehrlich machen. Auch hinsichtlich des Gewichtes der Reihenschlußmotoren gegenüber demjenigen von Gleichstrom-Hauptstrommotoren gleicher Leistung ist ein bedeutender Fortschritt zu verzeichnen. So gibt beispielsweise die letztgenannte Firma an, daß der Gewichtsfaktor (Umdrehungszahl in der Minute × Gewicht in Kilogramm : 100 × Pferdestärken), also

$$\frac{n \cdot G_M}{100 \cdot PS},$$

der die Ausnutzung des Materiales zu erkennen gestattet, für die Motoren der Bahn Murnau-Oberammergau

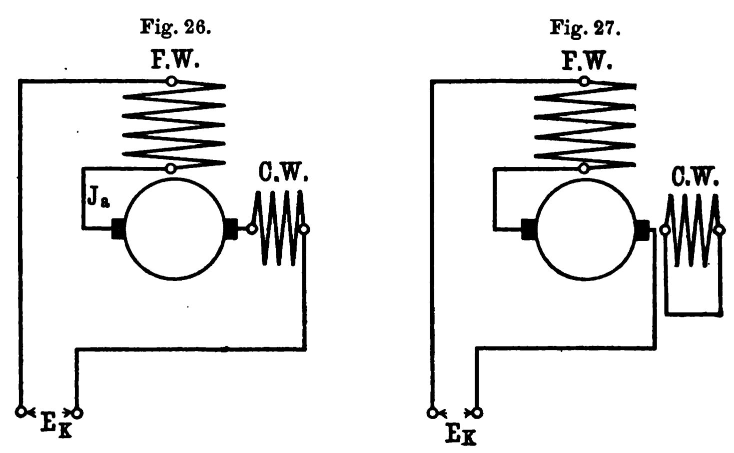
$$\frac{530 \times 2200}{100 \times 100} = 117,$$

für die Motoren der Bahn Rotterdam-Haag-Scheveningen

$$\frac{700 \times 2750}{100 \times 175} = 110$$

beträgt, also Werte zeigt, die nicht größer sind, als diejenigen von Gleichstrommotoren ähnlicher Größe. Immerhin wird jedoch der Reihenschlußmotor etwa 10 bis 15 Proz. schwerer ausfallen, als der Gleichstrom-Hauptstrommotor, und infolgedessen werden

Fig. 26. Fig. 27.



auch die Raumabmessungen größere werden. Ungeachtet dieser Nachteile, die immer mehr zu beheben man bemüht ist, hat der Reihenschlußmotor namentlich in letzter Zeit häufig Anwendung im Bahnbetriebe gefunden, und die bisher bekannt gewordenen Betriebsaufnahmen zeigen in jeder Beziehung günstige Ergebnisse.

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ist oft ein nicht befriedigender, kann jedoch erhöht werden durch Verminderung der EMK der Selbstinduktion E_s, wie dieses aus den bisherigen Gleichungen zu erkennen ist. Um eine Verbesserung zu erreichen, kann man eine Kompensationswickelung anwenden, die auf dem Magnetgehäuse angeordnet wird (Fig. 26 u. 27) und entweder in Reihe

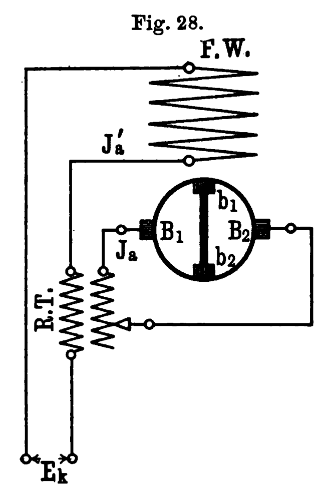
mit dem Anker bzw. der Erregung geschaltet, oder in sich kurzgeschlossen ist. Im letzteren Falle werden die zur Vernichtung des Ankerfeldes erforderlichen Amperewindungen von selbst durch transformatorische Wirkung zwischen Anker und Kompensationswickelung erzeugt.

Von den zahlreichen bisher für Bahnzwecke angegebenen Einphasenmotoren soll hier endlich noch der von La Tour und unabhängig von ihm von Winter und Eichberg angegebene und von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft auf den Linien der Borinage und Stubaitalbahn verwendete kompensierte Reihenschlußmotor[1]) Erwähnung finden.

11. Der kompensierte Reihenschlußmotor.

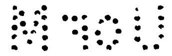
Diese Motortype stellt im wesentlichen eine Kombination des Reihenschlußmotors und Repulsionsmotors vor. Der Anker besitzt zwei Bürstenpaare $b_1 b_2$ und $B_1 B_2$ (Fig. 28), von denen das eine in der Richtung des Hauptfeldes $\mathfrak{Z}$ kurz geschlossen ist, während dem Anker durch das zweite $B_1 B_2$ Betriebsstrom zugeführt wird. Durch den Kurzschluß von $b_1 b_2$ wird das Hauptfeld $\mathfrak{Z}$ kompensiert, während der durch $B_1 B_2$ eintretende Strom J_a das eigentliche Erregerfeld induziert. Wie aus Fig. 28 leicht zu ersehen ist, ist J_a in Phase mit dem Erregerfelde und das Drehmoment infolgedessen am größten. Auf eine nähere theoretische Erklärung der Vorgänge kann hier jedoch nicht mehr eingegangen werden, und es sei auf die vorherigen Erläuterungen verwiesen[2]).

Fig. 28.



Der Motor besitzt gleichfalls die Eigenschaft, mit steigender Belastung an Geschwindigkeit ab- und an Zugkraft zuzunehmen und kann, da die Magnetwickelung konstruktiv unabhängig von

[1]) E. T. Z. 1905, Heft 7; E. B. u. B. 1905, Heft 11 u. 16.
[2]) Vgl. E. B. 1904, Heft 2.



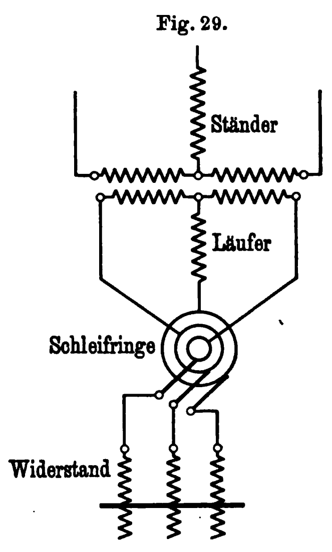
der Ankerwickelung ist, an Hochspannung gelegt werden. Der in Fig. 28 angegebene Transformator *R. T.* ist ein Autotransformator und dient zur Geschwindigkeitsregulierung (vgl. drittes Kapitel).

Die bisher ausgeführten Bahnanlagen mit Einphasen-Wechselstrom haben so günstige Betriebsresultate gezeitigt, daß man auch diese Frage als im allgemeinen gelöst ansehen kann, was namentlich für eine Umgestaltung von Vollbahnen mit Dampfbetrieb in solche mit elektrischem Betriebe von größter Bedeutung ist.

12. Der Drehstrommotor.

Noch bevor der Einphasenmotor in geeigneter Weise für den Betrieb elektrischer Fahrzeuge ausgebildet war, hatte der asynchrone Drehstrommotor Verwendung gefunden, und zwar waren es namentlich die Firmen Ganz & Co. und Brown Boveri & Cie., die sich mit der Anwendung des Drehstromes für Bahnzwecke eingehend beschäftigten. Die zurzeit erreichten Resultate haben den Erwartungen vollauf entsprochen und die Einwände, die abgesehen von der doppelten Kontaktleitung hauptsächlich gegen den Motor selbst in bezug auf Wirtschaftlichkeit und Tourenregulierung gemacht worden sind, niedergeschlagen.

Fig. 29.



Eine eingehende Behandlung des Drehstrommotors ist bereits im fünften Bande der Einzeldarstellungen von Dr. G. Benischke geschehen, so daß hier darauf verwiesen werden kann. Nur kurz sollen infolgedessen die für den Bahnbetrieb wichtigsten Punkte gestreift werden.

Der Drehstrommotor besteht aus einem sogenannten Ständer und Läufer, die beide mit mehrphasigen Wickelungen versehen sind, und von denen der erstere ruhend, der letzte beweglich angeordnet ist. Hieraus ist von vornherein ersichtlich, daß der

Motor mit Hochspannung betrieben werden kann, weil der Ständer mechanisch nicht mit dem Läufer in Verbindung steht. Der Läufer ist über Schleifringe mit Widerständen verbunden (Fig. 29), die beim Anfahren vorgeschaltet werden (drittes Kapitel) und während des Betriebes kurz geschlossen sind.

Bezeichnet a_1 und a_2 bzw. die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes und Läufers, so ist die Schlüpfung s definiert durch Gleichung 23)

$$s = \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad \dots \dots \quad 23)$$

oder da

$$a_1 = \frac{2 \pi n_1}{60}$$

$$a_2 = \frac{2 \pi n_2}{60},$$

so folgt, daß

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

und die Tourenzahl des Läufers

$$n_2 = n_1 (1 - s) \quad \dots \dots \quad 24)$$

Bekanntlich ist

$$n_1 = \frac{60 c_1}{p_1},$$

wenn c_1 die Periodenzahl des Ständerstromes bedeutet, und es folgt

$$n_2 = \frac{60 c_1}{p_1} (1 - s),$$

also ist die Tourenzahl n_2 des Läufers proportional der Periodenzahl des zugeführten Stromes J_1. Wählt man infolgedessen c_1 klein (etwa 15 bis 35), so läßt sich n_2 auf eine solche Größe reduzieren, daß der Läufer ohne Zwischenvorgelege direkt auf die Wagenachse aufgesetzt werden kann, ein Umstand, der zur Verbesserung des Wirkungsgrades erheblich beiträgt. Da n_2 immer der synchronen Tourenzahl zustrebt, ohne sie jedoch je zu erreichen, so wird sie bei Belastungsänderungen wenig variieren; der Drehstrommotor gleicht also in bezug auf die Tourenzahl vollkommen einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Ein wesentlicher Nachteil dieses Umstandes liegt nun auch hier darin, daß auf allen Steigungen,

sowie bei jeder Belastung die Geschwindigkeit des Wagens bzw. Zuges die gleiche bleibt, und es gelten demzufolge auch für den Drehstrommotor in analoger Weise die für den Nebenschlußmotor in dieser Hinsicht gegebenen Erklärungen. Aber auch der Drehstrommotor ist imstande, auf Gefällen, wenn er durch die lebendige Kraft des Fahrzeuges übersynchron angetrieben wird, einmal als Bremse zu wirken und dann als Generator Strom in das Netz zurückzusenden, ein Faktor, der bei Bergbahnen und nur beschränkter Kraftstation manche bedeutsamen Vorteile bietet (vgl. drittes Kapitel).

Das Drehmoment ist

$$D = \frac{p_2}{2\pi n_2 s} m w_2 J_2^2,$$

worin m die Anzahl der Läuferphasen, w_2 den Widerstand der Läuferwickelung und J_2 die sekundäre Stromstärke bedeutet. Da nun

$$m w_2 J_2^2 = V$$

die Stromwärmeverluste im Läufer angibt, so wird

$$D = \frac{p_2 V}{2\pi n_2 s} = \frac{75}{736}\,\frac{p \,.\, V}{2\pi n_2 s} = 0{,}0162 \frac{p V}{n_2 s} \text{mkg} \quad . \ 25\text{a})$$

Ist weiter P_1 die aufgewendete elektrische Energie, P_n die nutzbar vom Motor abgegebene, so ist auch

$$D = 0{,}0162 \frac{p_2 (P_1 - P_n)}{n_2 s} \quad . \ . \ . \ . \ . \ 25\text{b})$$

Bei Stillstand ist $s = 1$, und es folgt hieraus das Anzugsdrehmoment

$$D_a = 0{,}0162 \frac{p_2 (P_1 - P_n)}{n_2}$$

und die Anzugszugkraft

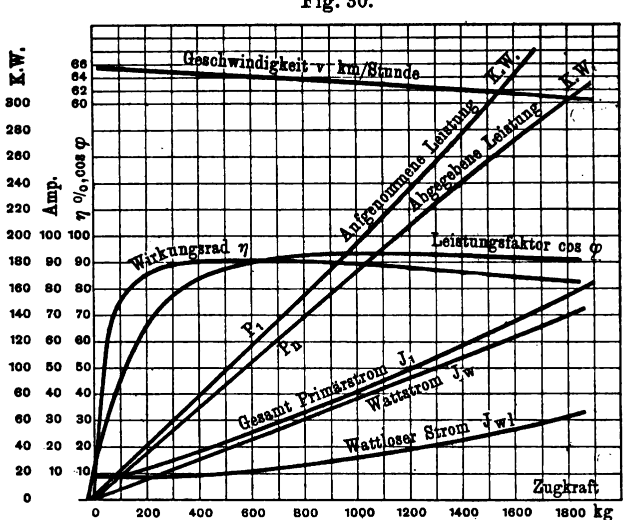
$$K_a = 0{,}0162 \cdot \frac{p_2 (P_1 - P_n)}{n \,.\, r} \text{kg} \quad . \ . \ . \ . \ 25\text{c})$$

Die Zugkraft ändert sich bei Belastungsänderungen ähnlich derjenigen eines Nebenschlußmotors.

Fig. 30 zeigt die charakteristischen Kurven des neuen Veltlintal-Lokomotivmotors von Ganz & Co., und sind diese ohne weitere Erklärung verständlich. Hinsichtlich der oben genannten Grundbedingungen stellt sich der Drehstrommotor verhältnis-

mäßig günstig. Er gestattet neben hoher Anzugszugkraft stärkere Überlastungen, als dies bei den Einphasen-Kommutatormotoren im allgemeinen der Fall ist, weil bei letzteren durch Kommutator und Bürsten eine bestimmte Grenze gezogen ist. Seine Gewichts- und Raumverhältnisse sind schon auf Seite 23 erwähnt worden. Die Schaltmöglichkeiten sind allerdings nicht so günstige und einfache, wie namentlich bei den Reihenschlußmotoren, haben jedoch auch befriedigende Lösungen gefunden.

Fig. 30.



Von den hervorragenden Anwendungen des hochgespannten Drehstromes für den direkten Betrieb von Vollbahnen sei nur auf die Schnellbahnversuche Marienfelde-Zossen bei Berlin der Siemens & Halske-A.-G. und der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, die Veltlintalbahn der Firma Ganz & Co., Budapest [1]), die Jungfraubahn der Maschinenfabrik Oerlikon und die Simplonbahn von Brown Boveri & Cie. hingewiesen, die in den Fachzeitschriften ausführliche Beschreibung gefunden haben.

[1]) Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1905: E. Cserháti, Die neuen Lokomotiven der Veltlintalbahn.

Drittes Kapitel.

Die Geschwindigkeitsregulierung.

13. Grundbedingungen.

Im nachfolgenden sollen nun weiter die Methoden besprochen werden, nach denen die Wagen- bzw. Zuggeschwindigkeiten beim Anfahren, bei Erhöhung oder Verminderung der Normalgeschwindigkeit und beim Bremsen geregelt werden können, wobei unter Normalgeschwindigkeit diejenige zu verstehen ist, die die Motoren bei voller Spannung entwickeln. Von den überaus zahlreichen Systemen werden jedoch nur diejenigen nähere Erklärung finden, die auf elektrischem Wege erfolgen und die heute in die Praxis am ausgedehntesten Eingang gefunden haben, und die hierbei auftretenden Vorgänge graphisch bzw. rechnerisch dargestellt werden.

Als Grundbedingungen für jede Methode der Geschwindigkeitsregulierung gelten in erster Linie Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und leichte Handhabung; ferner muß jede vorgenommene Änderung ruhig und stoßfrei erfolgen, um einesteils die Fahrgäste nicht zu gefährden bzw. unangenehm auf dieselben zu wirken, anderenteils zur Schonung der Wagen selbst. Des weiteren ist für eine leichte und bequeme Bedienung, wie auch für eine übersichtliche Anordnung der benötigten Apparate usw. Sorge zu tragen, um beispielsweise beim Bremsen im Augenblicke der Gefahr auch das zu erreichen, was beabsichtigt ist. Hieraus erhellt, daß zur Regelung der Geschwindigkeit nur äußerst wenig Handgriffe erforderlich sein dürfen, dieselbe also auf die einfachste Art erfolgen muß. Die im zweiten Kapitel aufgestellten Gleichungen für n und v lassen für jede Motorart leicht erkennen, mit welchen Mitteln eine Änderung der Geschwindigkeit erzielt werden kann.

14. Geschwindigkeitsregulierung für den Gleichstrom-Hauptstrommotor.

Für den Gleichstrom-Hauptstrommotor ergibt sich aus Gleichung 7) und 10) die Geschwindigkeit

$$v = 0{,}3768\,\frac{r}{\varphi}\cdot\frac{q\,.\,60\,.\,10^8}{p\,.\,N}\;\frac{[E_k - J_a(W_a + W_h)]}{\mathfrak{Z}}$$
$$= const\;\frac{[E_k - J_a(W_a + W_h)]}{\mathfrak{Z}} \quad . \; . \quad 26)$$

und es kann somit v durch Veränderung einer oder mehrerer Größen der Gleichung 26) erhöht oder vermindert werden. Heute kommen fast ausnahmslos zwei Methoden zur Anwendung und zwar Geschwindigkeitsregulierung durch:

1. Änderung der EMGK des Ankers
$$E_a = E_k - J_a\,(W_a + W_h);$$
2. Änderung des wirksamen Kraftflusses $\mathfrak{Z}$ durch Änderung der Erregung

bzw. die Kombination von 1. und 2.

Die EMGK E_a des Ankers ist einmal abhängig von der Spannung des zugeführten Stromes an den Bürsten des Motors E_k und dann von dem Gesamtwiderstande, der bei einem mit normaler Tourenzahl laufenden Motor

$$W_g = W_a + W_h.$$

Eine Änderung der Klemmenspannung gestatten nur zwei Stromzuführungssysteme, bei welchen die den Motorstrom direkt erzeugende Kraftquelle auf dem Triebwagen selbst untergebracht ist; es sind diese das System der Stromumformung auf dem Fahrzeuge selbst und das Akkumulatorensystem. Bei ersterem sind, wie im ersten Kapitel ausführlicher erläutert worden ist, die Achsentriebmotoren Gleichstrom-Hauptstrommotoren, und der für dieselben erforderliche Strom wird dem auf der Lokomotive angeordneten Gleichstromgenerator entnommen. Die im Anker eines mit konstanter Tourenzahl betriebenen Generators induzierte EMK E_{ag} und infolgedessen die Klemmenspannung E_{kg} ist abhängig von dem wirksamen Kraftflusse $\mathfrak{Z}_g$, also der Zahl der Amperewindungen der Erregung. Durch Zu- bzw. Abschalten eines Teiles derselben wird sich demzufolge E_{kg} variieren lassen, die Spannungsregulierung also auf die nämliche Art erfolgen, wie sie für

die Generatoren im Kraftwerke zur Anwendung kommt, und zwar durch feinstufige Nebenschlußregulierungswiderstände. Für das Anfahren wird nun die Spannung E_{kg} auf der Gleichstromseite des Motorgenerators der Lokomotive soweit, als zulässig bzw. erforderlich, herunterreguliert, und es vollzieht sich somit diese Periode der Geschwindigkeitsregulierung fast ohne jegliche Energieverluste im Motorstromkreise, ein Umstand, der von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist. Weiter läßt sich aber auch jede gewünschte Tourenzahl der Motoren, also Geschwindigkeit des Zuges, auf diese Weise einstellen. Ferner ist unschwer zu erkennen, daß man durch diese Methode ein ökonomisches Bremsen und Energierückgabe an die Kontaktleitung erzielen kann.

Das Akkumulatorensystem gestattet eine Änderung der Klemmenspannung E_k auf einfachste Art durch Zu- und Abschalten von Zellen und zwar mittels eines ähnlich einem Zellenschalter ausgebildeten Kontrollers. Auch dieses System der Geschwindigkeitsregulierung ist naturgemäß ein betriebssicheres und wirtschaftliches, abgesehen von den Nachteilen, die das System an sich aufweist (vgl. erstes Kapitel).

Bezeichnet Z die Zahl der Akkumulatorenzellen, W_l den Widerstand der Wagenleitungen, und nimmt man eine mittlere Zellenspannung von etwa 1,9 Volt an, so ist die Spannung an den Bürsten des Motors

$$E_k = 1{,}9\, Z - J\, W_l,$$

wobei das letzte Glied der Gleichung $J W_l$ etwa nur dann zu berücksichtigen sein wird, wenn der Zug aus mehreren Wagen zusammengesetzt ist, die jeder oder etwa der erste und letzte mit Motoren ausgerüstet sind. Mit Hilfe des im zweiten Kapitel Gesagten läßt sich dann v für jede eingestellte Zellenzahl ohne Schwierigkeit bestimmen.

Einen weiteren Einfluß auf E_a [Gleichung 26)] erzielt man durch Änderung des Gesamtwiderstandes W_g und zwar durch Vorschalten von Widerständen W_v. Diese Methode wird heute bei Einmotorenwagen ausschließlich benutzt und findet bei Mehrmotorenwagen in Verbindung mit dem unter 2. genannten System Anwendung.

Schaltet man in den Ankerstromkreis soviel Widerstand

$$W_v = W_{v_1} + W_{v_2} + \cdots + W_{vn},$$

daß $$E_k = J_a(W_a + W_h + W_v),$$

so wird $$E_a = 0$$

und $$v = 0.$$

Es kann auf diese Art naturgemäß stets nur eine Tourenverminderung erzielt werden.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der großen Einfachheit der Schaltung und in der Betriebssicherheit, besitzt aber den Nachteil der Unwirtschaftlichkeit, weil ein Teil der zugeführten elektrischen Energie während der Regulierung nutzlos in den Vorschaltwiderständen verzehrt wird. Sie eignet sich infolgedessen nicht für dauernde Geschwindigkeitsänderungen, sondern wird nur für das Anfahren benutzt, weil hier die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die kurze Zeit der Benutzung gegenüber der Einfachheit in den Hintergrund tritt.

Zur Bestimmung der Vorschaltwiderstände bedient man sich zweckmäßig folgenden graphischen Verfahrens, wobei als bekannt vorausgesetzt wird die v und K-Kurve des Motors in Abhängigkeit von der Stromstärke, sowie der Eigenwiderstand $W_a + W_h$.

Aus der Beziehung

$$W_v = \frac{E_k - E_v}{J_a} - (W_a + W_h),$$

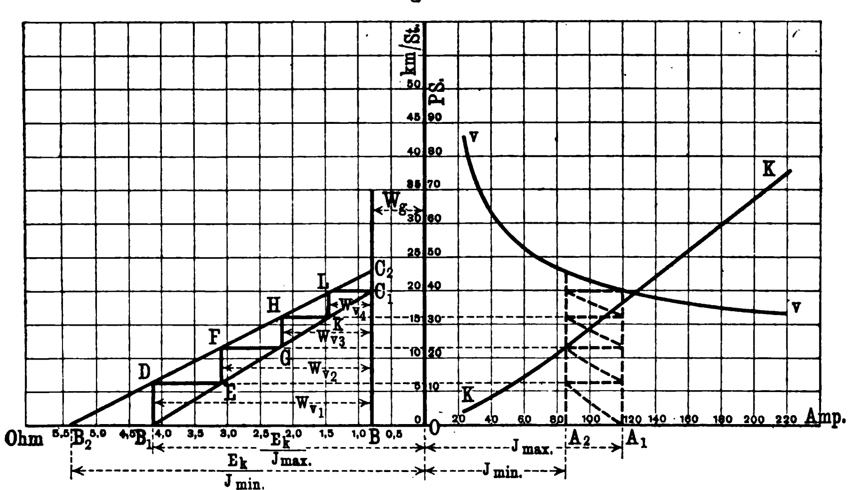
worin E_v die der jeweiligen Geschwindigkeit entsprechende EMGK bezeichnet, erkennt man, daß der vorgeschaltete Widerstand nach einer Geraden abnehmen muß, wenn J konstant ist. Da es jedoch praktisch nicht ausführbar ist, W_v von seinem Maximalwerte bis auf Null gleichmäßig abnehmen zu lassen, so teilt man W_v in einzelne Stufen, deren Größe mit Berücksichtigung der auf S. 53 genannten Grundbedingung einer stoßfreien ruhigen Geschwindigkeitsänderung gewählt werden muß. Man setzt infolgedessen für die durch die Veränderlichkeit von W_v bedingten Stromstärken zwei Grenzen fest, J_{max} und J_{min}, und zwar ist J_{max} gegeben durch die vom Motor im Augenblick des Anfahrens zu leistende Zugkraft K_a, so daß

$$W_{v_0} = \frac{E_k}{J_{max}} - (W_a + W_h).$$

Beginnt der Motor sich zu drehen, so steigt die EMGK und die Stromstärke sinkt bis auf einen Wert J_{min}, der so zu bestimmen ist, daß einmal die Stromschwankung J_{max} bis J_{min} und der damit verbundene Spannungsabfall nicht zu groß wird und dann die durch das Sinken der Stromstärke hervorgerufene Geschwindigkeitsänderung, also die dem Wagen erteilte Beschleunigung, nicht zu stark ausfällt. Da die Zahl der Schaltstufen nur gering sein darf (etwa vier bis fünf Stück), um möglichst rasch die Normal-



Fig. 31.



geschwindigkeit zu erreichen, so kommt man für die Bestimmung von J_{min} schneller zum Ziel, wenn man die Zahl der Schaltstufen m wählt und J_{min} bzw. die entsprechende Größe des Vorschaltwiderstandes durch Probieren findet. Die Konstruktion gestaltet sich folgendermaßen: Man trägt im Motordiagramm nach links in passendem Maßstabe zunächst den Eigenwiderstand

$$W_g = W_a + W_h$$

auf (Fig. 31) und findet aus den Beziehungen:

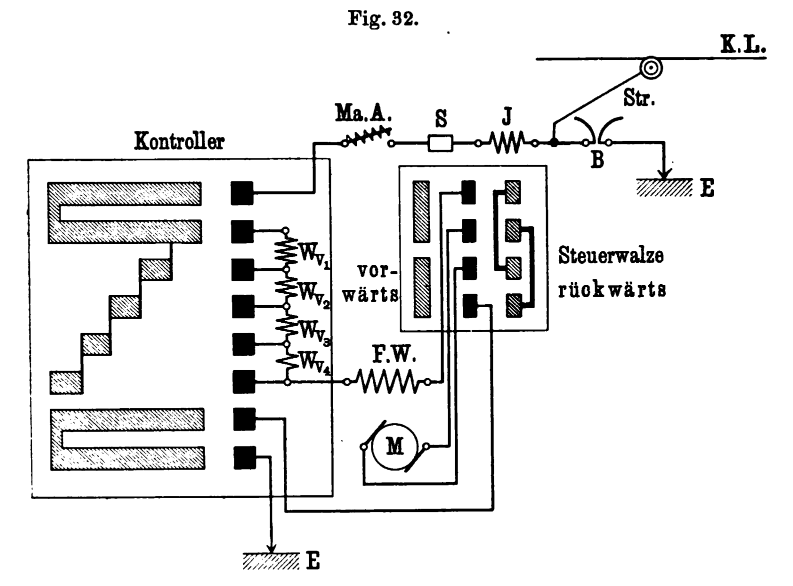
$$W_v + W_a + W_h = \frac{E_k}{J_{max}}$$

für $$v = 0$$

und $$W_v = \frac{E_k}{J_{max}} - (W_a + W_h) = 0$$

die Punkte B_1 und C_1 der J_{max}-Linie $B_1\,C_1$. Dann wählt man die Zahl der Schaltstufen und eine beliebige Stromstärke J_{min}, berechnet, wie oben, die Lage der beiden Punkte B_2 und C_2 der J_{min}-Linie und probiert nun unter Änderung von J_{min} und demzufolge der Geraden $B_2\,C_2$ so lange, bis die Zahl der Schaltstufen erreicht ist, d. h. bis die Zickzacklinie $B_1\,D\,E \ldots L\,C_1$ im Punkte C_1 endet. Rechts werden dann die den Vorschaltstufen ent-

Fig. 32.

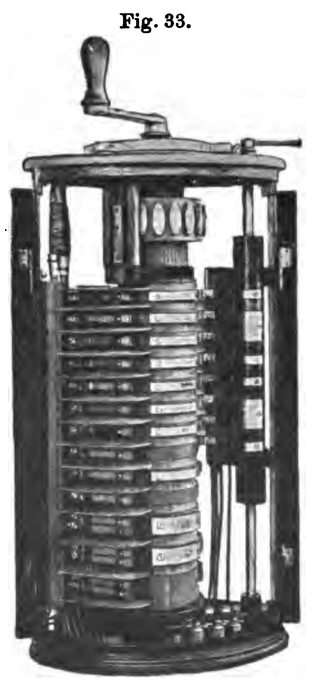


sprechenden Geschwindigkeitszunahmen eingetragen. Das Zu- und Abschalten der einzelnen Widerstände, wie auch die Umkehr der Drehrichtung und das später zu besprechende Bremsen, falls dasselbe auf elektrischem Wege erfolgen soll, wird mit einem Kontroller (Fahrschalter) in Verbindung mit einer Steuerwalze ausgeführt, dessen schematische Schaltungsweise Fig. 32 und eine gebräuchliche mechanische Ausführung Fig. 33 zeigt.

Der Vorgang während des Anfahrens gestaltet sich an der Hand der Fig. 31 und 32 folgendermaßen. Liegt der Stromabnehmer *Str.* an der Kontaktleitung *K. L.* und wird der Ausschalter

Ma. A. eingelegt, die Steuerwalze auf die gewünschte Fahrtrichtung und die Kontrollerwalze auf Kontakt 1 gestellt, dann erhält der Motor einen Strom J_{max}, der durch den vorgeschalteten Widerstand begrenzt ist. Der Motor beginnt sich infolgedessen zu drehen und entwickelt dabei eine EMGK, die die Stromstärke schwächt und mit wachsender Tourenzahl steigt, und zwar wird diese Geschwindigkeitszunahme in Fig. 31 dargestellt durch die Ordinate im Punkte B_1. Ist die Stromstärke bis auf J_{min} gesunken, oder in Fig. 31 schneidet die Ordinate in B_1 die J_{min}-Linie, dann ist mit der Kontrollerwalze auf den Kontakt 2 überzugehen. Hierbei soll nun der Voraussetzung nach die Stromstärke bei unveränderter Geschwindigkeit wiederum bis auf J_{max} anwachsen, und man findet somit die zweite Widerstandsstufe, indem man durch *D* eine Parallele zur Abszissenachse legt, die die J_{max}-Linie in *E* schneidet. Die erste Stufe wird demnach gleich *DE*. Das Gleiche, wie vorher, wird nun nach dem Umschalten wieder eintreten, d. h. E_a und *v* steigen und J_{max} geht hierbei bis auf J_{min} zurück, bis schließlich sämtliche Widerstände ausgeschaltet sind und die Geschwindigkeitsregulierung dann selbsttätig nach der Motorkurve erfolgt.

Fig. 33.



Ist der Triebwagen (Motorwagen, Lokomotive) mit zwei oder mehr Motoren — im allgemeinen jedoch nicht mehr als vier — ausgerüstet, so kann eine Geschwindigkeitsänderung zunächst durch die Schaltung der Motoren untereinander erreicht werden, und zwar durch die unter 2. genannte Methode der Veränderung des Kraftflusses $\mathfrak{Z}$ jedes Motors, d. h. durch die Schaltung der Anker- und Feldwickelungen einmal in Reihe und ein zweites Mal parallel. Man nennt diese die Methode der Reihenparallelschaltung und gewinnt bei Anwendung derselben den schätzens-

werten Vorteil, Geschwindigkeitsstufen zu besitzen, auf denen dauernd und in der Hauptsache wirtschaftlich gefahren werden kann. Das Anfahren, sowie der Übergang von der Reihen- zur Parallelschaltung muß jedoch auch hier aus leicht erklärlichen

Fig. 34.

Fig. 35.

Gründen unter Zwischenschaltung von Vorschaltwiderständen erfolgen. In Fig. 34 und 35 ist die Schaltungsweise für zwei und vier Motoren im Prinzip und in Tafel I ein den praktischen Ausführungen entsprechendes vollständiges Schaltungsschema dargestellt, das weiter unten erklärt werden wird.

Besitzen die Motoren übereinstimmende charakteristische Kurven und bezeichnet: E_{a_r}, E_{ap}, n_r, n_p, v_r, v_p die EMGK, Tourenzahl und Ge-

schwindigkeit bzw. bei Reihen- und Parallelschaltung, so ist bei zwei Motoren die EMGK jedes Motors:

bei Reihenschaltung:

$$E_{a_r} = \tfrac{1}{2}(E_k - 2\,J\,W_g),$$

bei Parallelschaltung:

$$E_{ap} = E_k - J\,W_g,$$

und da nach den Angaben des zweiten Kapitels die Tourenzahl abhängig ist von der EMGK des Ankers, so verhält sich

$$\frac{n_r}{n_p} = \frac{E_{a_r}}{E_{ap}} = \frac{E_k - 2\,J\,W_g}{2\,(E_k - J\,W_g)}.$$

Setzt man mit hinreichender Genauigkeit

$$\frac{E_k - 2\,J\,W_g}{E_k - J\,W_g} \cong 1,$$

so folgt, daß ein Zweimotorwagen bei Reihenschaltung der Motoren mit der Hälfte der normalen Geschwindigkeit läuft. Da es in den meisten Fällen genügen wird, den Wagen oder Zug nur mit zwei Geschwindigkeiten verkehren zu lassen, so werden bei vier eingebauten Motoren zwei dauernd parallel geschaltet und die Reihen-Parallelschaltung mit den so gebildeten Gruppen ausgeführt (Fig. 35). Die Gesamtzugkraft ist die algebraische Summe der Zugkräfte der einzelnen Motoren unter der Voraussetzung, daß die charakteristischen Kurven, sowie Laufdurchmesser und Übersetzungsverhältnis gleich sind.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeitskurve bei Reihenschaltung der Motoren kann folgendes graphische Verfahren[1]) schnell zum Ziele führen. In Fig. 36 ist wiederum als bekannt vorausgesetzt die Geschwindigkeitskurve v_p bei voller Spannung, sowie der Eigenwiderstand $W_g = W_a + W_h$. Die Kurve der EMGK bei Reihenschaltung E_{a_r} ist eine Parallele zu E_{ap} und wird für eine beliebige Stromstärke aus der Beziehung gefunden, daß

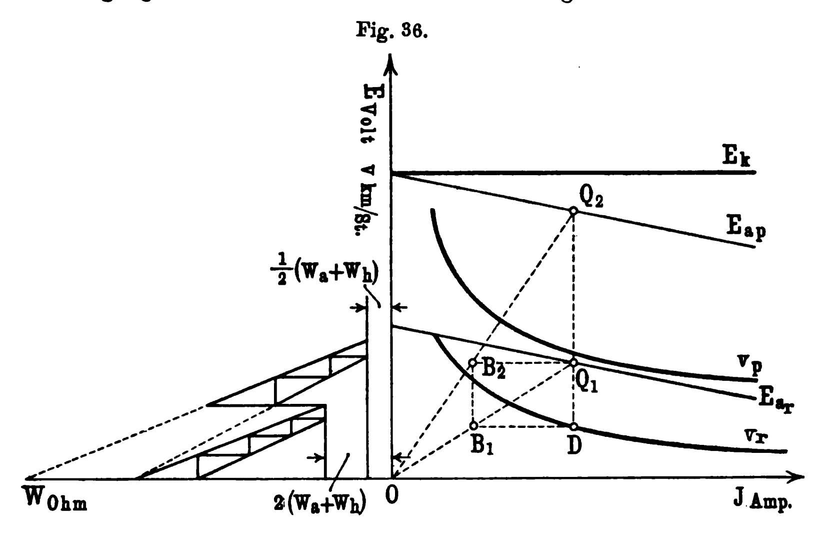
$$E_{a_r} = \frac{E_k}{2} - 2\,J\,W_g.$$

Auf dem gleichen zeichnerischen Wege, der im zweiten Kapitel für die Bestimmung der v-Kurve eingeschlagen wurde, kann dann die

[1]) Von Prof. O. S. Bragstad, vgl. E. Arnold: Die Gleichstrommaschinen, II. Band.

v_r-Kurve konstruiert werden, wobei in Fig. 36 dieselben Buchstaben verwendet sind, die den analogen Punkten der Fig. 13 entsprechen. Auch die Größenbestimmung der Vorschaltwiderstände und die diesen entsprechende Geschwindigkeitszunahme geschieht auf die nämliche Weise, wie in Fig. 31 angegeben. Es ist hierbei jedoch darauf zu achten, daß der konstante Widerstand der Motoren bei Reihenschaltung $2\,(W_a + W_h)$ bzw. $4\,(W_a + W_h)$ und bei Parallelschaltung $^1/_2\,(W_a + W_h)$ bzw. $^1/_4\,(W_a + W_h)$ nach Fig. 34 und 35 beträgt. Die Zahl der Vorschaltstufen für den Übergang von der Reihen- zur Parallelschaltung kann kleiner und

Fig. 36.



zweckmäßig so bestimmt werden, daß die für das Anfahren benutzten Widerstände teilweise wieder verwendet werden. Auf große Genauigkeit kommt es hierbei nicht an, weil das Abschalten der einzelnen Stufen durch den Wagenführer naturgemäß nicht so erfolgen wird, wie bei der Bestimmmung derselben vorausgesetzt wurde.

Aus dem auf Tafel I dargestellten vollständigen Schaltungsschema eines mit vier Motoren ausgerüsteten Wagens geht die allgemeine Anordnung der Leitungen, Apparate, sowie der Stromverlauf usw. hervor: Der dem Wagen von der Kontaktleitung *K.L.* durch den Stromabnehmer *Str.* zugeführte Strom passiert zunächst

die Induktionsspule *J.*, den selbsttätigen Maximalausschalter *Ma. A.*, den auf jeder Plattform untergebrachten Handausschalter *A.* und verzweigt sich dann bei 1 nach den Kontrollern K_{I} und K_{II}. Von hier aus wird er zu den Steuerwalzen geführt und geht dann zu den einzelnen Kontakten der Kontrollerwalze, mit Hilfe derer die Widerstandsstufen eingeschaltet werden. Zur Vernichtung der beim Abschalten der Widerstände auftretenden Funken dienen die magnetischen Ausbläserspulen. Die Bremsung für den Motorwagen erfolgt durch die Kurzschlußbremse (siehe S. 80), für den Anhängewagen durch elektromagnetische Bremsung, zu welchem Zwecke an den Stirnseiten des Motorwagens die Bremskuppelungen vorgesehen sind. Fig. 37 stellt die praktische Ausführung einer solchen Kuppelung und

Fig. 37.

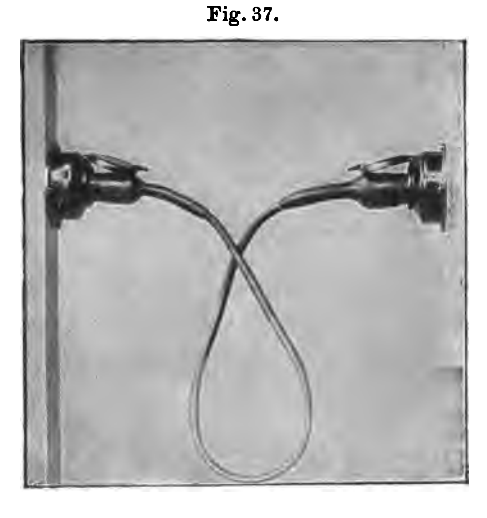


Fig. 38.



Fig. 38 diejenige der Widerstände dar. Ferner ist in Tafel I die Schaltung der Lichtleitung für Motor- und Anhängewagen, sowie die Blitzschutzvorrichtung (siehe auch Fig. 6) angegeben. Es soll noch erwähnt werden, daß für die Umkehr der Drehrichtung der

Motoren zweckmäßig die Stromrichtung im Anker geändert wird, da durch Umschaltung der Magnetwickelung unnötig Energie durch die Umpolarisierungen verzehrt wird.

15. Geschwindigkeitsregulierung für den Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Die Gleichung 14) für die Tourenzahl eines Nebenschlußmotors

$$n = \frac{q \cdot 60 \cdot 10^8}{p \cdot N \cdot \mathfrak{Z}} (E_k - J_a W_a)$$

läßt erkennen, daß die Geschwindigkeitsregulierung in einer dem Hauptstrommotor ähnlichen Weise erfolgen kann und zwar:

1. durch Änderung der im Anker induzierten EMK

$$E_a = E_k - J_a W_a$$
$$J_a = J - i_n;$$

2. durch Änderung des wirksamen Kraftflusses $\mathfrak{Z}$, d. h. der Erregung.

Die unter 1. genannte Regulierungsmethode besteht ebenfalls in dem Vorschalten von Widerständen W_v in den Ankerstromkreis und dient lediglich zum Anfahren, da eine dauernde Benutzung der Widerstände, die hier besser Anfahrwiderstände genannt werden sollen, naturgemäß unwirtschaftlich ist.

Zur Bestimmung der Größe dieser Widerstände soll hier ein rechnerisches Verfahren angegeben werden. Für die Anfahrstromstärke werden wieder nach den gleichen Gesichtspunkten, wie für den Hauptstrommotor, zwei Grenzen J_{max} und J_{min} gewählt. Der gesamte vorzuschaltende Widerstand ist demnach

$$W_g = (W_a + W_v) = \frac{E_k}{J_{max}}$$
$$W_v = \frac{E_k}{J_{max}} - W_a.$$

Beginnt sich nun der Motor zu drehen, so sinkt infolge der sich entwickelnden EMGK E_{a_1} die Stromstärke und zwar wird dann, wenn J nur bis auf J_{min} fallen soll,

$$E_{a_1} = E_k - J_{min} W_{v_1}.$$

Jetzt ist die erste Kontrollerstufe ab- und die zweite Widerstandsstufe einzuschalten, so daß, wenn die Stromstärke den Wert J_{max} nicht überschreiten soll,

$$E_k - J_{max} W_{v_2} = E_{a_1} = E_k - J_{min} W_{v_1}$$

oder

$$J_{max} W_{v_2} = J_{min} W_{v_1},$$

$$\frac{J_{min}}{J_{max}} = \frac{W_{v_2}}{W_{v_1}} = \gamma.$$

Das Gleiche gilt für alle weiteren Stufen, so daß hieraus folgt:

$$W_{v_2} = \gamma W_{v_1},$$
$$W_{v_3} = \gamma W_{v_2} = \gamma^2 W_{v_1},$$
$$W_{v_4} = \gamma W_{v_3} = \gamma^3 W_{v_1} \text{ usw.},$$

oder die Größe der einzelnen Widerstände selbst

$$w_{v_1} = W_{v_1} - W_{v_2} = (1-\gamma) W_{v_1} = (1-\gamma) \frac{E_k}{J_{max}},$$
$$w_{v_2} = W_{v_2} - W_{v_3} = (\gamma - \gamma^2) W_{v_1} = \gamma w_{v_1}, \quad \text{usw.}$$

Die letzte Stufe bestimmt sich aus der Überlegung, daß nach Abschalten derselben nur noch der Eigenwiderstand des Motors eingeschaltet bleibt, zu

$$E_k - W_{v\,m-1} J_{min} = E_k - W_a J_{max}$$

oder

$$W_g = \gamma W_{v\,m-1}$$

und mit Berücksichtigung der obigen Entwickelungen

$$W_{v\,m-1} = \gamma^{m-1} W_{v_1},$$
$$\gamma^m W_{v_1} = W_g = \gamma^m \frac{E_k}{J_{max}},$$

oder

$$\log \gamma = \frac{1}{m} \log \left(\frac{J_{max} W_g}{E_k} \right).$$

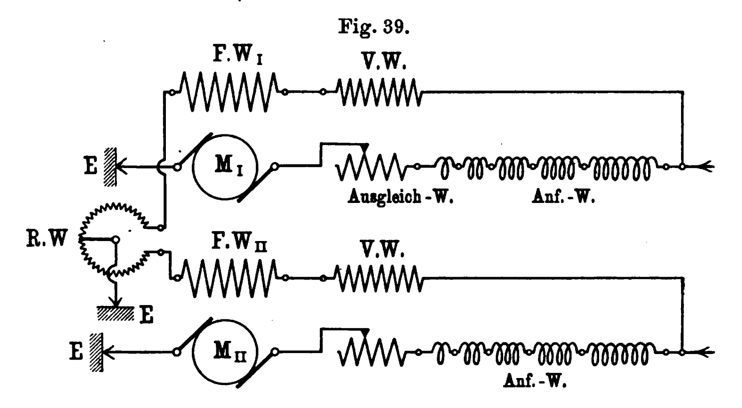
Es ist somit bei der Wahl der Stufenzahl und der Kenntnis des Ankerwiderstandes W_a das Verhältnis γ und die Größe der einzelnen W_v leicht zu bestimmen. Schneller noch kann das von E. A. N. Pochin[1]) angegebene Verfahren zum Ziele führen. Es

[1]) E. A. N. Pochin, E. T. Z. 1897, S. 346.

wird ein Streifen Papier auf die Skala des Rechenschiebers gelegt und die Strecke zwischen W_v und W_g in m gleiche Teile geteilt; dann geben die den Teilstrichen entsprechenden Zahlen des Rechenschiebers die Stufung des Kontrollers an. Die Stufenzahl wird bei Nebenschlußmotoren jedoch eine wesentlich größere, weil die Regulierung im Ankerstromkreise erfolgt und eine zu hohe Anfahrstromstärke mit Rücksicht auf das Kraftwerk und den Triebwagen selbst vermieden werden muß. Man ordnet daher zweckmäßig einige Vorstufen an.

In Fig. 39 ist das Schaltungsschema im Prinzip und in Tafel II die genaue Schaltanordnung eines mit zwei Nebenschlußmotoren ausgerüsteten für Arbeitsrückgewinnung bei Talfahrt bestimmten

Fig. 39.



Wagens dargestellt. In Tafel II wird der Strom nach Passieren der Induktionsspule *J.*, der Hauptsicherung *S.* und dem mit Ausschlag nach zwei Seiten versehenen Amperemeter *Amp.* geteilt und zunächst zu zwei automatischen Maximalausschaltern *Ma. A.* geführt, die so konstruiert sind, daß eine Stromunterbrechung im Hauptstrome gleichzeitig auch die an die Ausschalter angeschlossenen Nebenschlußleitungen stromlos macht. Jeder Ankerstromkreis besitzt demnach eine gesonderte Leitung. Nach Passieren der Ausschalter führt der Strom über regulierbare Ausgleichswiderstände, die zur gleichmäßigeren Leistungsverteilung auf die beiden Motoren vor die Anker geschaltet sind, zu den Kontrollern, die acht Widerstandsstufen und sechs Leerkontakte besitzen, und von hier durch die Steuerwalzen für die Fahrtrichtung zu den Motor-

ankern und zur Erde. Der Nebenschlußstromkreis, der hinter der Hauptsicherung *S.* abgezweigt ist, ist zunächst gleichfalls mit dem Kontroller verbunden und führt dann zu der mit letzterem zwangsläufig gekuppelten Nebenschlußwalze, von dort über Sicherungen *S.* zu den Nebenschlußkontakten der Maximalausschalter und weiter über Vorschaltwiderstände zu den Feldwickelungen *F. W.* der Motoren. Nach Passieren der Wickelungen geht der Strom zu einem Regulierwiderstand und nach Erde. Ferner sind Parallelverbindungen zur Nebenschlußwalze angeordnet, die beim Ausschalten der Motoren die Nebenschlußwickelungen von der Kontaktleitung abschalten, kurzschließen und gleichzeitig erden. Die in den Nebenschlußstromkreis eingebauten Hilfswiderstände werden während der Fahrt kurzgeschlossen. Zur Feststellung der Stromrichtung (Berg- und Talfahrt) und zur Kontrolle für das ordnungsmäßige Arbeiten der Motoren sind in die Leitung zwei Stromrichtungsanzeiger eingebaut. In Tafel II ist nur eine der übereinstimmend ausgeführten Wagenhälften gezeichnet.

Die unter 2. genannte Methode der Geschwindigkeitsregulierung durch Änderung der Erregung kann bei Einmotorenwagen erreicht werden durch Schwächung der Erregung. Es ist hierbei nur eine Geschwindigkeitserhöhung über die normale möglich, weil mit abnehmender Erregung die Tourenzahl steigt, wie Gleichung 14) erkennen läßt. Die Zugkraft des Motors wird, da dieselbe unabhängig von n ist, nicht geändert.

Sind mehrere Nebenschlußmotoren eingebaut, so kann auch hier die Reihen-Parallelschaltung Verwendung finden, wobei die Schaltung in Reihe nur für den Ankerstromkreis vorgenommen wird, während die Magnetwickelungen dauernd parallel geschaltet bleiben. Das Zusammenarbeiten mehrerer Nebenschlußmotoren gestaltet sich jedoch nicht ebenso günstig, wie dasjenige von Hauptstrommotoren. Bei nicht völlig übereinstimmenden charakteristischen Kurven, ja schon bei geringen Unterschieden in den Laufraddurchmessern, also ungleicher Abnutzung der Laufräder, wird bei Reihenschaltung, wenn die Felder nicht genau gleich stark sind, der Fall eintreten, daß der Motor mit stärkerem Felde langsamer zu laufen bestrebt ist und eine größere Zugkraft entwickelt, als der Motor mit schwächerem Felde. Hierdurch kann eine gefährliche Überlastung des einen Motors hervorgerufen werden. Bei Parallelschaltung ist es sogar möglich, daß der

Motor mit stärkerem Felde bei einer gewissen Wagengeschwindigkeit eine EMGK entwickelt, die genau gleich ist der Spannung der Arbeitsleitung. Dieser Motor wird infolgedessen keinen Strom aufnehmen, also auch keine Zugkraft entwickeln, während der Motor mit schwächerem Felde das ganze Drehmoment herzugeben hat. Es erhellt hieraus, daß bei mehreren zusammenarbeitenden Nebenschlußmotoren die Belastungsverteilung auf die einzelnen Motoren eine wesentlich ungünstigere ist, wie bei Hauptstrommotoren. Man begegnet diesem Umstande durch Ausgleichswiderstände in den Ankerstromkreisen, wie in Tafel II angegeben. Trotzdessen haben die Motoren mit Nebenschlußwickelung nur geringe Anwendung gefunden und werden heute in der Hauptsache für Bergbahnen benutzt, wo Energierückgewinnung erzielt werden soll.

16. Geschwindigkeitsregulierung für den Wechselstrom-Einphasenmotor.

Wie die im zweiten Kapitel entwickelten Gleichungen für die Wechselstrom-Einphasenmotoren zeigen, ist die Tourenzahl n auch hier abhängig von der im Anker induzierten EMK

$$E_a = k \frac{p \cdot n}{60} N \cdot \mathfrak{Z}\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Durch die Möglichkeit, den Wechselstrom in beliebiger Weise transformieren zu können, ist somit die heute allein zur Verwendung kommende Methode der Geschwindigkeitsregulierung für Einphasenmotoren in einfachster Weise gegeben, und zwar durch Änderung der Spannung an den Bürsten des Motors. Man schaltet die Primärwickelung eines Transformators direkt zwischen Fahrdraht und Erde, während die sekundäre Wickelung in einzelne Stufen unterteilt wird, die mit der Kontrollerwalze verbunden sind (Fig. 40). Die Größe der einzelnen Schaltstufen ist aus der Beziehung, daß die Transformatorspannungen E_{I} und E_{II} proportional den Windungszahlen $\mathfrak{w}_1$ und $\mathfrak{w}_2$ sind, leicht zu bestimmen, denn es ist

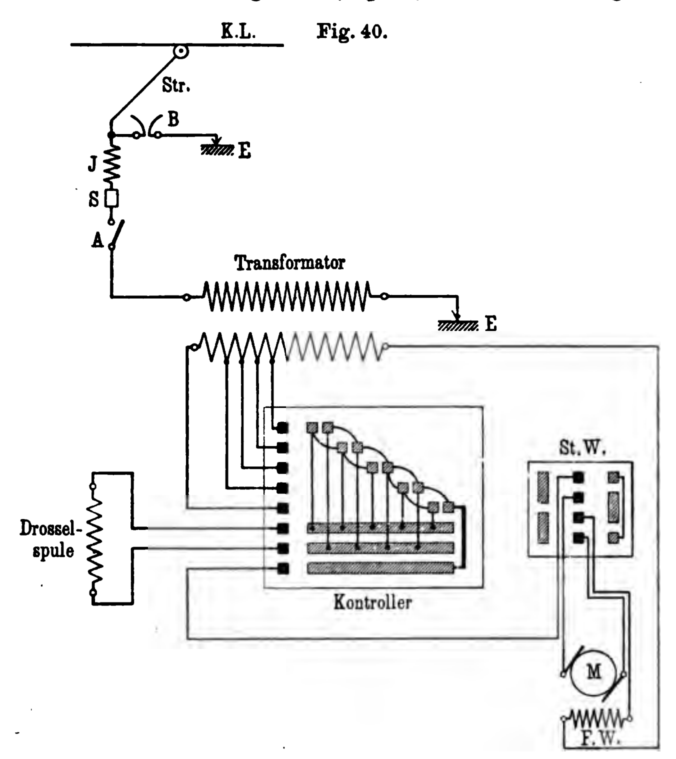
$$\frac{E_{I}}{E_{II}} = \frac{\mathfrak{w}_1}{\mathfrak{w}_2},$$

oder also

$$E_{II} = E_{I} \frac{\mathfrak{w}_2}{\mathfrak{w}_1}.$$

Die erste Stufe ergibt sich aus der für die Anfahrperiode im ersten Momente zugelassenen Beschleunigung und der von den Motoren zu entwickelnden Zugkraft, während die anderen den gewünschten Geschwindigkeitszunahmen entsprechen müssen. Aus dem Heubach schen Diagramm (Fig. 24) kann mit Leichtigkeit die

Fig. 40.



einer bestimmten EMK E_a entsprechende Tourenzahl, Leistung, Zugkraft usw. gefunden werden.

Eine den bisherigen Methoden zur graphischen Ermittelung der Größe der einzelnen Vorschaltstufen ähnliche ist von R. Wikander[1]) angegeben worden und soll hier gleichfalls Erwähnung finden. Man wählt für die beim Anfahren auftretenden

[1]) Vgl. R. Wikander, Die Abstufung der Transformatoren mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis E. B. u. B. 1906, Heft 28.

Stromstöße wiederum zwei Grenzen J_{max} und J_{min}, und es ist demnach die im Augenblicke des Anfahrens an den Klemmen des Motors, also auf der Sekundärseite des Transformators, erforderliche Spannung

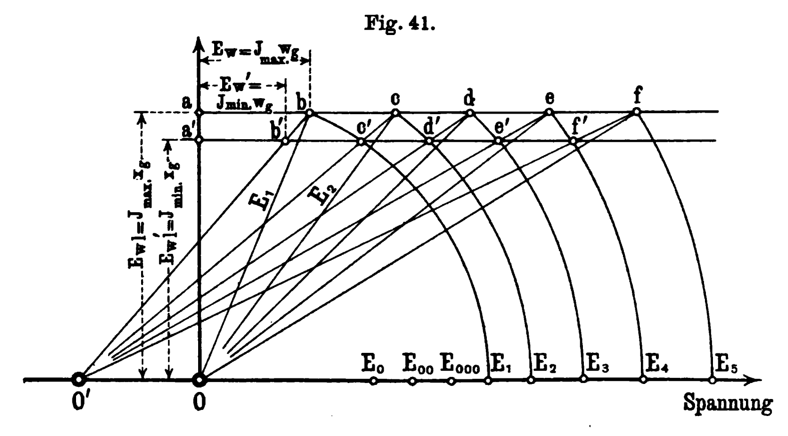
$$E_2 = J_{max} \sqrt{w_g^2 + x_g^2}$$
$$= J_{max}\, z_g,$$

wenn

$$z_g = \sqrt{w_g^2 + x_g^2}$$

die Impedanz des Motors bedeutet. Um auch hier, wie beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor, die im ersten Moment auftretende Anfahrstromstärke nicht unzulässig hoch anwachsen zu lassen,

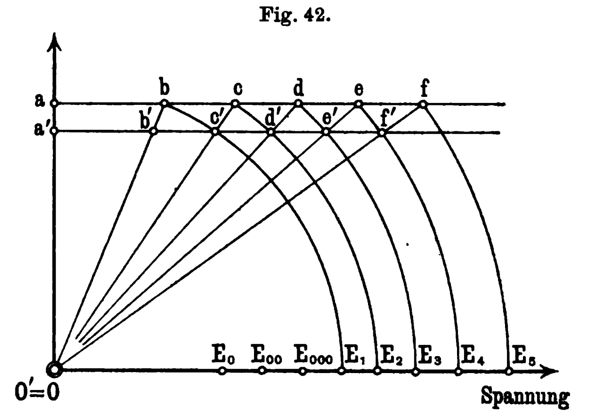
Fig. 41.



ordnet man einige Vorstufen E_0, E_{00}, E_{000} (Fig. 41) an, die auch verwendet werden können, wenn der Zug mit kleiner Geschwindigkeit fahren soll, so z. B. für Rangierdienst. Die Abstufung des Transformators kann nun mit Hilfe folgenden zeichnerischen Verfahrens ermittelt werden, dem wiederum ein rechtwinkeliges Koordinatensystem zugrunde gelegt wird. Die Wechselspannung E_1 an den Motorklemmen setzt sich geometrisch zusammen aus der wattlosen Komponente $E_{wl} = J_{max} x_g = O a$ und der Wattkomponente $E_w = J_{max} w_g = a b$ (Fig. 41). Wird nun mit E_1 eingeschaltet, so beginnt sich der Motor zu drehen und die Stromstärke, die anfangs den Wert J_{max} besitzt, wird infolge der sich entwickelnden EMGK auf J_{min} sinken. Dementsprechend wird auch sowohl E_{wl} von $O a$ auf $O a' = E_{wl} = J_{min} x_g$, wie

auch E_w von $a\,b$ auf den Wert $a'b' = E_w' = J_{min} w_g$ zurückgehen. Schlägt man nun um O als Mittelpunkt mit $O\,b = E_1$ einen Kreisbogen, so schneidet dieser eine durch a' zur Abszissenachse parallele Gerade in einem Punkte c', und es stellt dann die Strecke $b'\,c'$ die nützliche EMGK des Ankers dar. Um die Geschwindigkeit des Motors zu erhöhen, muß die Spannung erhöht, also eine Transformatorstufe mit Hilfe der Kontrollerwalze abgeschaltet werden, wobei die Stromstärke der Voraussetzung nach wiederum nur bis zu dem Werte J_{max} ansteigen soll. Die wattlose und Wattkomponente der Spannung nehmen hierbei ihre ursprünglichen Werte $O\,a$ und $a\,b$ an, während die EMGK proportional E_2 auf den Betrag $b\,c$ steigt. Graphisch findet man

Fig. 42.



nun die Spannung $O\,c = E_2$ auf folgende Weise: Man verlängerte $b\,b'$ über b' hinaus bis zum Schnittpunkte O' mit der Abszissenachse, verbindet O' mit c' und verlängert $O'c'$ bis zum Schnittpunkte c mit $a\,b$. Der weitere Vorgang beim Abschalten der einzelnen Stufen gestaltet sich dann analog der obigen Betrachtung.

Die Punkte O und O' fallen nun in Wirklichkeit nahezu zusammen, und man kann sich infolgedessen besser des in Fig. 42 dargestellten vereinfachten Verfahrens bedienen, das nach dem Vorausgegangenen einer weiteren Erklärung nicht mehr bedarf. Aus Fig. 42 geht hervor, daß

$$\frac{\overline{O\,b'}}{\overline{O\,b}} = \frac{\overline{O\,c'}}{\overline{O\,c}} = \frac{\overline{O\,d'}}{\overline{O\,d}} = \cdots = \frac{E_1}{E_2} = \frac{E_2}{E_3} = \frac{E_3}{E_4} = \cdots = \gamma.$$

Also hat auch hier, wie bei den Gleichstrom-Nebenschlußmotoren, die Abstufung nach einer geometrischen Reihe zu erfolgen. Die Stromstärken J_{max} und J_{min} sind nach den schon bei den Gleichstrommotoren genannten Gesichtspunkten zu wählen. Mit Hilfe der charakteristischen Kurven läßt sich dann leicht die Geschwindigkeitszunahme bzw. die jedesmalige Tourenzahl des Motors finden.

Diese Art der Geschwindigkeitsregulierung wird bei Reihenschlußmotoren ohne Ausnahme benutzt, und zwar kann mit Hilfe derselben nicht nur günstig angefahren, sondern auch jede gewünschte Tourenzahl für die Motoren ohne Schwierigkeit eingestellt werden. Hinsichtlich Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit ist diese Methode in jeder Beziehung befriedigend, denn es treten namentlich mit Bezug auf die Ökonomie bei Anwendung derselben mit Ausnahme der geringen Verluste im Transformator selbst, die jedoch ohne weiteres unberücksichtigt bleiben können, keinerlei andere Verluste auf.

Fig. 40 zeigt die schematische Schaltanordnung für einen Reihenschlußmotor, bei der besonders darauf hingewiesen werden soll, daß beim Übergange von einer Transformatorstufe zur nächsten der dazwischen liegende Teil des Transformators durch die Kontrollerwalze jedesmal kurzgeschlossen wird. Um nun keine Stromunterbrechung eintreten zu lassen, wird in diesem Momente eine Drosselspule eingeschaltet, oder der Kurzschlußstrom über einen Widerstand geführt, wie letzteres in Tafel III gekennzeichnet ist, die das vollständige Schaltungsschema eines mit Reihenschlußmotoren ausgerüsteten Wagens der Murnau-Oberammergau-Bahn darstellt.

Der hochgespannte Strom wird (Tafel III) der Kontaktleitung mittels der beiden Bügelstromabnehmer entnommen und über eine Hochspannungssicherung *Sp. S.* und einen Hochspannungsölschalter der Primärwickelung des Reguliertransformators zugeführt, dessen zweiter primärer Pol mit der Erdleitung verbunden ist. Die sekundäre Seite des Transformators ist in acht Schaltstufen von je etwa 17,5 Volt unterteilt, die an die Kontrollerwalze angeschlossen sind. Der nunmehr niedrig gespannte Arbeitsstrom geht dann über Sicherungen und Steuerwalzen für die Fahrtrichtung zu den parallel geschalteten Motoren. Besonders beachtenswert ist noch die für die Fahrt in den Wagen-

hallen gewählte Schaltung. Um hier einer gefahrloseren Bedienung wegen nicht gleichfalls mit Hochspannung arbeiten zu müssen, sind in der Endstation der Bahn Transformatoren in die Arbeitsleitung eingeschaltet, die den Strom auf 150 Volt transformieren. An einem Ende des Triebwagens sind Steckkontakte für einen tragbaren Stromabnehmer angeordnet, mittels dessen dann die Stromzuführung erfolgt; der Niederspannungsstromkreis ist gleichfalls gesichert und an die Steuerwalzen angeschlossen. Mit Hilfe eines doppelpoligen Schalters — und zwar jedesmal desjenigen in der gewünschten Fahrtrichtung — erfolgt die Bedienung je eines Motors, wobei mit Rücksicht auf die Kürze der zu befahrenden Strecken von einer besonderen Geschwindigkeitsregulierung Abstand genommen ist. Der Einfachheit wegen ist in Tafel III statt der Steckkontakte ein Stromabnehmer gezeichnet.

Auch der Repulsionsmotor und der kompensierte Reihenschlußmotor werden auf die nämliche Art mittels Reguliertransformatoren angelassen und reguliert. Für die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft nach den Patenten von Winter und Eichberg gebauten Einphasen-Kommutatormotoren wird jedoch eine spezielle Schaltungsweise des Reguliertransformators gewählt. Wie schon im zweiten Kapitel angedeutet, erfolgt hier die Regelung der Geschwindigkeit mit Hilfe eines sogenannten Autotransformators, eines nur mit einer Wickelung versehenen Transformators, dessen prinzipielle Schaltung aus Fig. 43 hervorgeht. In jeder Windung der am zweckmäßigsten nur auf einem Kerne angeordneten Wickelung erhält man dieselbe induzierte EMK. Zwischen den Punkten C und B wird also eine Spannung E_2 herrschen, die entsprechend dem Verhältnis der Windungszahlen $\frac{w_2}{w_1}$ kleiner ist,

Fig. 43.

K.L.
Schiene
$E_1 = E_k$
w_1
J_1
A
B
C
E_2
w_2
J_2

als die Spannung $E_1 = E_k$ zwischen A und B. Der bei der Spannung E_1 demnach vom Fahrdrahte abzugebende Belastungsstrom J_1 ruft, wenn man den Magnetisierungsstrom des Transformators unberücksichtigt läßt, einen sekundären Strom J_2 hervor, der gefunden wird aus der Beziehung, daß

$$J_2 E_2 = J_1 E_1$$

$$J_2 \mathfrak{w}_2 = J_1 \mathfrak{w}_1$$

oder

$$J_2 = \frac{J_1 E_1}{E_2} = \frac{J_1 \mathfrak{w}_1}{\mathfrak{w}_2}.$$

Beim Winter-Eichberg-Motor wird nun nur die dem Anker durch die Erregerbürsten $B_1 B_2$ zugeführte Spannung transformiert, während die Feldwickelung direkt an der Oberleitung liegt (Fig. 28).

17. Zugsteuerung.

Auf Strecken mit stark schwankender Frequentierung, auf denen der Betrieb mittels Motor- und Anhängewagen erfolgen soll, wird es oft angezeigt erscheinen, bei stärkerer Belastung die Zahl der Anhängewagen zu erhöhen. Da nun naturgemäß die Triebwagen mit Rücksicht auf ihre Größe und ihre wirtschaftlichen Betriebsverhältnisse nur für ein bestimmtes mitzuführendes Nutzgewicht berechnet werden müssen, so wird man auf den Gedanken kommen, statt eines der Anhängewagen einen Triebwagen in den Zug einzufügen, um die Leistungsfähigkeit desselben zu erhöhen. Es müßte in diesem Falle die Regelung der Geschwindigkeit für jeden Motorwagen getrennt erfolgen, was natürlich überaus schwer durchzuführen wäre, da namentlich dann, wenn zwischen den Triebwagen noch Anhängewagen eingeschoben sind, eine Verständigung der Wagenführer nicht gut durchzuführen ist.

Um nun die Vorteile eines Motorwagens mit denjenigen einer größeren Zugeinheit zu verbinden, setzt man die Züge aus zwei oder mehreren Motorwagen zusammen und steuert dieselben vom vordersten Führerstande aus. Man wendet zu diesem Zwecke das zuerst in Amerika bekannt gewordene sogenannte „Vielfachsteuerungssystem“ an, wie es in mannigfacher Ausführung auch

in Deutschland neuerdings zur Einführung gekommen ist, so beispielsweise auf der Hoch- und Untergrundbahn Berlin, auf der Rheinuferbahn Köln-Bonn, auf der Spindlersfelder Versuchsbahn usw. Während auf der Hochbahn Berlin die Geschwindigkeitsregulierung von der Zugspitze aus durch einen einfachen Kontroller erfolgt, wobei die Motoren parallel an eine durchgehende Hauptleitung angeschlossen sind, wird bei den zuletzt genannten Systemen das Ein- und Ausschalten der Widerstände für die Achsentriebmotoren unter Zwischenschaltung von Relais mit Hilfe besonderer Steuerschalter vorgenommen. Zur Betätigung dieser Relais verwendet man besondere niedrig gespannte Hilfsströme, die bei Gleichstromwagen etwa einer kleinen Batterie und bei Einphasenbahnen einem eigens für diesen Zweck angeordneten Transformator entnommen werden.

Alle Schaltungen erfolgen durch Öffnen und Schließen dieser auf elektromagnetischem Prinzip beruhenden Relais, die mit Schaltern kombiniert sind (sog. Schützen), von einer „Meisterwalze" aus, die infolgedessen nur schwache Ströme zu führen hat. Durch Betätigung dieser Meisterwalze erhalten die Schützen in bestimmter Reihenfolge Strom und schließen die entsprechenden Stromkreise, schalten also bei Gleichstrom Widerstandsstufen aus oder ein bzw. bei Wechselstrom Transformatorstufen zu oder ab.

In Tafel IV ist das Schaltungsschema der Spindlersfelder Versuchsbahn[1]) wiedergegeben, deren Motorwagen mit Winter-Eichberg-Motoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ausgerüstet sind. Die Schaltungsmanipulationen erfolgen hier mit Hilfe einer Vielfachsteuerung von der jedesmaligen Zugspitze aus. Mit Rücksicht darauf, daß das Schaltungsbild eine Reihe interessanter, wissenswerter Eigentümlichkeiten aufweist, soll dasselbe näher erklärt werden.

Der Strom, der dem Triebwagen durch die Stromabnehmer zugeführt wird, geht über die übliche Blitzschutzsicherung zunächst zu einem Transformator Tr_1, der den Strom für die Steuerung der Schützen (Relais), für den Pumpenmotor einer Westinghouse-Bremse und für die Beleuchtung der Wagen liefert,

---

[1]) Vgl. Das Einphasen-Bahnsystem der Union Elektrizitäts-Gesellschaft, insbesondere die Versuchsbahn Niederschöneweide-Spindlersfeld von Dr. F. Eichberg, Z. d. V. d. I. 1904, Heft 9.

gleichzeitig aber auch zu einem automatisch wirkenden Maximal-Ölausschalter *Ma. A.* Dieser Schalter wird mittels einer Spule, die von der Meisterwalze aus ihren Strom erhält, eingeschaltet und ausgeschaltet durch die Funktion einer zweiten Spule, die an einen im Hochspannungsstromkreise liegenden Stromtransformator Tr_{II} angeschlossen ist. Überschreitet die Stromstärke eine bestimmte Größe, so wird durch diesen Relaisschalter der Hilfsstromkreis des Hochspannungsschalters und somit dieser selbst geöffnet. Von letzterem aus gelangt der Strom zur Primärwickelung des Reguliertransformators für die Erregung, dann durch zwei Motorabschalter A_I und A_{II}, die nur den Zweck haben, einen ev. defekt gewordenen Motor abzuschalten, in die parallelgeschalteten Ständerwickelungen und von hier aus zur Erde. Die sekundäre Wickelung des Reguliertransformators ist unterteilt, und zwar führt das eine Ende derselben zur Steuerwalze, die übrigen zu den einzelnen Schützen, deren zweite Klemmen untereinander und gleichfalls mit der Steuerwalze in Verbindung stehen. Auch die Erregerstromkreise sind unter Zwischenschaltung von Trennschaltern mit letzterer verbunden; die Steuerwalzen werden automatisch von dem Fahrtrichtungsschalter aus betätigt.

Das Ingangsetzen der Triebwagen geschieht nun auf folgende Weise. Zunächst wird der Fahrtrichtungsschalter auf den ersten Kontakt gestellt und zwar entweder auf vorwärts oder rückwärts. Dadurch wird einmal die Steuerwalze durch das Relais 6 oder 7 in die gewünschte Fahrtrichtung gebracht, weiter aber erhalten auch die Spulen *r* und *h'* von *h* aus Strom und der Hochspannungsstromkreis wird durch den Maximalausschalter geschlossen. Geht man nun mit dem Fahrtrichtungsschalter auf den zweiten Kontakt [1]) über und betätigt die Meisterwalze, so erhalten die Spulen I bis V der Reihe nach Strom und schalten die Schützen, die mit den Abzweigungen des Reguliertransformators in Verbindung stehen, ein. Sämtliche zu bedienenden Apparate führen demnach Niederspannung, ein Umstand, der für die gefahrlose Bedienung von größter Bedeutung ist.

[1]) Bei der tatsächlichen Ausführung sind die Punkte *h* und *s* an einen in der Fahrkurbel untergebrachten Druckknopf angeschlossen, der niedergedrückt sein muß, wenn die Schützen Strom erhalten sollen. Läßt der Führer die Kurbel los, so werden die Motoren sofort ausgeschaltet.

18. Geschwindigkeitsregulierung für den Drehstrommotor.

Aus den im zweiten Kapitel über den asynchronen Drehstrommotor gemachten Angaben geht hervor, daß die Tourenzahl desselben bei allen Belastungsänderungen annähernd konstant ist und nur abhängt von der Schlüpfung s, der Periodenzahl c des zugeführten Stromes und der im Läufer induzierten EMK. Ist E_k die Klemmenspannung, so ist für eine bestimmte Stromstärke J_2 im Läufer

$$\frac{E_k}{J_2} = \sqrt{(w_1 + w_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}.$$

Da nun der Drehstrommotor mit kurzgeschlossenem Läufer naturgemäß nicht eingeschaltet werden darf, weil einmal die dem Wagen erteilte Anfangsbeschleunigung durch die augenblickliche hohe Tourenzahl, die der Motor anzunehmen bestrebt sein würde, weit über das zulässige Maß hinausginge und weiter die durch die Anfahrstromstärke hervorgerufene Spannungsschwankung unzulässig hoch ausfallen würde, so schaltet man in den Läuferstromkreis gleichfalls Vorschaltwiderstände ein (Fig. 29), die nach Erreichen der Normalgeschwindigkeit kurzgeschlossen werden. Zur Bestimmung der Größe der einzelnen Vorschaltstufen kann man sich des gleichen rechnerischen Verfahrens bedienen, wie es für den Nebenschlußmotor angegeben wurde, indem auch hier die Stromstärke im Läufer zwischen zwei Grenzen $J_{2\,max}$ und $J_{2\,min}$ variiert wird.

Ist der Vorschaltwiderstand W_v, so ist

$$\frac{E_k}{J_{2\,max}} = \sqrt{(w_1 + w_2 + W_v)^2 + (x_1 + x_2)^2}$$

und wenn wiederum $\gamma = \frac{J_{2\,min}}{J_{2\,max}}$, so folgt

$$w_1 + w_2 = (w_1 + w_2 + W_v)\,\gamma^m,$$

woraus γ oder m bestimmt werden kann, wenn die konstanten Widerstände der Ständer- und Läuferwickelung w_1 und w_2 bekannt sind und γ oder m gewählt wird. Wie aus Gleichung 25) hervorgeht, wird durch das Einschalten von Widerstand in den

Läuferstromkreis gleichzeitig das größte Drehmoment, also die höchste erreichbare Zugkraft auf den Anlauf verlegt[1]).

In Tafel V ist das vollständige Schaltungsschema einer mit zwei Drehstrommotoren ausgerüsteten Lokomotive dargestellt. Durch die beiden Stromabnehmer *Str.* und die Hauptsicherungen *S.* wird der Strom über die doppelpoligen Ausschalter *A.* den Ständerwickelungen der Achsentriebmotoren zugeführt. Die Läuferwickelungen sind an die von den Kontrollern K_{I} und K_{II} gesteuerten Widerstände angeschlossen. Ein Spannungsmesser zeigt jederzeit die Höhe der Betriebsspannung an, während zur Beobachtung des von den Motoren aufgenommenen bzw. abgegebenen Stromes ein Amperemeter eingebaut ist. Beide Instrumente sind, um Hochspannung aus denselben fernzuhalten, an Meßtransformatoren angeschlossen. Zwecks Erzeugung der für die Luftdruckbremse erforderlichen komprimierten Luft dient ein kleiner an einen besonderen Transformator angeschlossener Drehstrommotor. Die Lichtleitungen für Lokomotive und Beiwagen sind gleichfalls der Niederspannungsseite dieses Transformators entnommen. Die dritte Phase ist mit den Schienen verbunden, also geerdet.

Werden die Triebwagen direkt mit Hochspannung betrieben, so sind sämtliche Hochspannung führenden Teile in besonderen geerdeten Abschlüssen unterzubringen, und die Betätigung der Schalter und Kontroller erfolgt dann zweckmäßig auf pneumatischem Wege[2]).

Aus der Beziehung, daß die Periodenzahl

$$c = \frac{p \cdot n}{60}$$

oder die Tourenzahl

$$n = \frac{60 \cdot c}{p},$$

folgt weiter bei Einmotorenwagen eine Geschwindigkeitsregulierung durch Veränderung der Polzahl des Motors, die jedoch ihrer verwickelten Schaltanordnung wegen bisher nicht oder nur versuchsweise angewendet worden ist.

---

[1]) Vgl. Dr. G. Benischke: Der asynchrone Drehstrommotor, Bd. V der Einzeldarstellungen.

[2]) Die neuen Lokomotiven der Veltlintalbahn von Béla Valatin E. B. und B. 1905.

Sind jedoch **zwei** oder **mehr** Motoren eingebaut, so findet heute ähnlich der Reihenparallelschaltung die sogenannte **Kaskadenschaltung** Verwendung. Verbindet man den Läufer des ersten Motors mit dem Ständer des zweiten Motors (Fig. 44), so wird die Tourenzahl

$$n = \frac{60\,c}{p_1 + p_2},$$

wenn p_1 und p_2 bzw. die Polpaarzahlen der beiden Motoren bezeichnen. Besitzen beide Motoren die gleiche Anzahl Pole, so werden bei der **Kaskadenschaltung zweierlei Geschwindigkeiten** zu erreichen möglich sein, mit denen dauernd und vor allem wirtschaftlich gefahren werden kann. Das Anfahren geschieht wiederum mit Vorschaltwiderständen, die in den Läuferstromkreis des zweiten Motors eingeschaltet werden. Die

Fig. 44.

Zugkraft K bleibt bei Kaskadenschaltung ungeändert, ein Umstand, der beim Befahren von Steigungen von wesentlicher Bedeutung ist.

Läuft der Triebwagen im Gefälle, so werden, wenn die synchrone Tourenzahl überschritten ist, die Motoren zu Generatoren und liefern Strom in die Arbeitsleitung. Ein gleiches tritt ein, wenn bei voller Fahrt die Motoren plötzlich in Kaskade geschaltet werden. Sie laufen dann einmal als Generatoren und wirken hierdurch gleichzeitig bremsend.

Bei ausgedehnten Bergbahnen wird auf diesen Vorgang ganz besonders Rücksicht zu nehmen sein[1]), weil hierdurch der KW-Stundenverbrauch eines Zuges während einer ganzen Fahrt (vgl. viertes Kapitel) wesentlich vermindert werden kann.

---

[1]) Vgl. Beförderung schwerer Eisenbahnzüge mit elektrischem Strom von Béla Valatin. E. B. u. B. 1905.

19. Die elektrischen Bremsen.

Die allgemeine Anwendung[1]) derselben namentlich als Gebrauchsbremsen ist durch die ihnen anhaftenden Nachteile, die bei den einzelnen Systemen der elektrischen Bremsung besonders hervorgehoben werden sollen, gegenüber der der Luftdruckbremsen in neuerer Zeit wesentlich zurückgegangen und beschränkt sich heute fast ausschließlich auf Straßenbahnen[2]), doch werden sie auch hier bei schwereren Wagen immer seltener verwendet. (Berlin, Hannover, Leipzig.)

Als Grundbedingungen für alle Bremsen, ob sie elektrisch, pneumatisch oder von Hand betätigt werden, gelten in erster Linie Betriebssicherheit und leichte Bedienbarkeit ohne besondere Kraftaufwendung, ferner stoßfreies Arbeiten und die Möglichkeit, in Gefahrsfällen ein sofortiges sicheres Halten des Wagens oder Zuges zu ermöglichen. Inwieweit die elektrischen Bremsen diesen Anforderungen genügen, wird besonders gekennzeichnet werden.

Gewisse allgemeine Vorteile sind allen elektrischen Bremssystemen gemeinsam und zwar einmal die Unabhängigkeit vom Betriebsstrome, weil die lebendige Kraft des rollenden Wagens zur Hervorrufung der Bremswirkung benutzt wird und ferner die einfache Bedienung. Sie sind infolge dieser Umstände im allgemeinen als bedingt betriebssicher zu bezeichnen.

Man unterscheidet in der Hauptsache folgende Systeme:

die Kurzschlußbremsung,
„ Rückstrombremsung,
„ elektromagnetische Bremsung,
„ die Nutzbremsung,

deren Art und charakteristische Eigenschaften in folgendem näher erläutert werden sollen.

Die Kurzschlußbremsung. Sie wird nur bei Hauptstrommotoren zur Anwendung gebracht und beruht auf dem Prinzip, die Motoren, angetrieben durch die lebendige Kraft des Wagens, als Generatoren wirken zu lassen und so die für den Antrieb der-

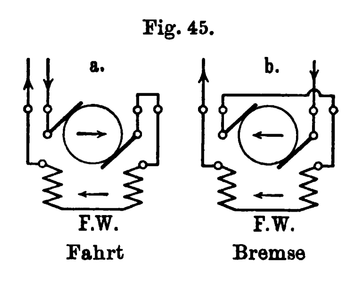
---

[1]) Vgl. Die Sachgemäßheit der Bremsen elektr. Straßenbahnen von Dr. Ing. Kramer, E. B. 1904, S. 197 ff.

[2]) Über Bremssysteme für elektr. Straßenbahnen von P. Scholte, E. B. und B. 1906, S. 696.

selben benötigte Kraft dem Wagen zu entziehen. Der erzeugte Strom wird dann in Widerständen vernichtet. Da ein Hauptstrommotor bei unveränderter Schaltung von Anker und Feldwickelung als Generator nicht in gleichem, sondern entgegengesetztem Drehsinne laufen muß, so muß der Strom entweder im Anker oder in den Feldwickelungen seiner Richtung nach geändert werden, um den Motor in gleicher Drehrichtung als Generator arbeiten zu lassen. Die Schaltung wird mit Hilfe des Kontrollers beim Übergange zu den Bremskontakten ausgeführt und gestaltet sich, wie Fig. 45 a und b schematisch andeutet.

Fig. 45.



Läuft der als Generator geschaltete Motor mit der Tourenzahl n, so ist die im Anker induzierte EMK

$$E_a' = E_k' + J(W_a + W_h) = const\ v$$

und das erforderliche Drehmoment

$$D' = \frac{E_a' J}{\frac{2\pi . n}{60}}$$

oder da auch hier

$$E_a' = f(J),$$

so ist das Drehmoment proportional dem Quadrate der Stromstärke. Der von den Motoren zu entwickelnden Zugkraft entspricht nun ein von den als Generatoren laufenden Motoren verlangtes Drehmoment, das gleich der Zugkraft wäre, wenn keine Verluste auftreten würden. Bezeichnet η' den gesamten Wirkungsgrad einschließlich Zahnradübersetzung usw., so wird demnach

$$\frac{9{,}81 . K . v}{3{,}6} = J[E_k' + J(W_a + W_h)] . \eta' \quad . \quad . \quad . \quad 27)$$

und es erhellt hieraus, daß die Kurve der Bremskraft von derjenigen der Zugkraft abweicht. Aus Gleichung 27) folgt

$$\eta' = \frac{2{,}725 . K . v}{E_a' . J}$$

und die Bremskraft

$$K_b = \frac{K}{\eta'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 28)$$

woraus unter Zugrundelegung des Motordiagramms die K_b-Kurve berechnet werden kann (Fig. 46). Diese Bremskraft darf nun, um eine möglichst große Wirkung zu erzielen, die vom Triebwagen für die Fortbewegung des Zuges zu leistende Zugkraft nicht übersteigen, so daß

$$K_b \leqq 1000\, G_a \, . \, \mathfrak{a} - K_r \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 29)$$

worin K_r den zur Überwindung der rollenden Reibung (vgl. viertes Kapitel) erforderlichen Teil der Zugkraft bedeutet. Um nun die Bremskraftkurve ermitteln zu können, wird die nächste Aufgabe darin bestehen, die induzierte EMK zu finden, die der Motor als Generator bei einer gewissen Wagengeschwindigkeit erzeugt. Ist im Motorstromkreise kein äußerer Widerstand vorhanden, so wird

$$E_a' = E_k' + J(W_a + W_h) = const. v,$$

denn auch hier ist die induzierte EMK proportional der Geschwindigkeit. Schaltet man nun in den Generatorstromkreis einen Widerstand W_b ein, so wird

$$E_a' = E_k' + J(W_a + W_h + W_b) = const\, v_1.$$

Soll nun die Stromstärke J konstant bleiben, so muß W_b mit abnehmender Geschwindigkeit gleichfalls und zwar proportional abnehmen. Da dieses aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist, so wird man W_b in einzelne Stufen teilen, die der Reihe nach abgeschaltet werden, und die Stromstärke J zwischen zwei Werten J_{max} und J_{min} variieren lassen, übereinstimmend mit dem Vorgange während der Anfahrperiode.

Die Größe dieser einzelnen Widerstandsstufen soll nun mittels eines graphischen Verfahrens [1]) (Fig. 46) bestimmt werden. Aus Gleichung 29) und an Hand der auf Grund derselben berechneten Bremskraftkurve K_b ergibt sich die maximale Bremskraft und aus dem Motordiagramm die maximale Stromstärke J_{max}. Bei J_{max} besitzt der Motor eine Geschwindigkeit v und demzufolge kann

---

[1]) Siehe Müller-Mattersdorf: Die Bahnmotoren.

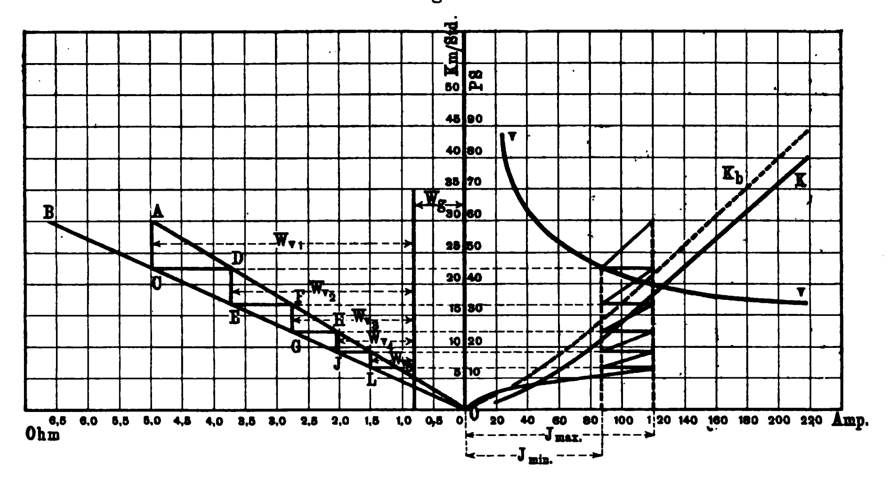
$$E'_a = c \cdot v = E'_k + J_{max}(W_a + W_h) = J_{max}(W_b + W_a + W_h)$$

$$c = \frac{E'_k + J_{max}(W_a + W_h)}{v}$$

berechnet werden, wenn $(W_a + W_h)$ bekannt ist. Man wählt nun die maximale Geschwindigkeit, bei der noch wirksam gebremst werden soll v_{max} und findet aus obiger Gleichung

$$E'_a = c \cdot v_{max}.$$

Fig. 46.



Soll J_{max} bei v_{max} erzeugt werden, so muß der Gesamtwiderstand des Stromkreises

$$W_g = \frac{E'_a}{J_{max}}$$

oder der vorzuschaltende Widerstand

$$W_b = \frac{E'_a}{J_{max}} - (W_a + W_h) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 30)$$

sein. Nach den gleichen Gesichtspunkten, wie für das Anfahren, wird dann J_{min} angenommen und W'_b wie oben berechnet.

In Fig. 46 ist das erläuterte Verfahren graphisch dargestellt. Betrage beispielsweise die maximale Bremskraft des Motors 1400 kg, der eine Stromstärke von 120 Amp. entsprechen würde,

ist ferner die Geschwindigkeit des Wagens bei dieser Stromstärke $v = 20$ km/St. und $W_a + W_h = 0{,}8$ Ohm, so ist (Gleichung 26)

$$c = \frac{E_a}{v} = \frac{E_k - J_{max}(W_a + W_h)}{v} = \frac{500 - 120 . 0{,}8}{20} = 20{,}2,$$

wobei $E_k = 500$ Volt angenommen ist.

Soll nun bei einer Höchstgeschwindigkeit von 30 km/St. gebremst werden können, so wird die induzierte EMK

$$E_a' = c\, v_{max} = 20{,}2 . 30 = 606 \text{ Volt}$$

und

$$W_g = \frac{E_a'}{J_{max}} = \frac{606}{120} \cong 5 \text{ Ohm}$$

betragen müssen.

Auf die nämliche Weise wird dann für $J_{min} = 90$ Amp. der Gesamtwiderstand $W_g \cong 7$ Ohm gefunden. Trägt man nun die so erhaltenen Werte für W_b in das Diagramm Fig. 46 ein und verbindet die Punkte A und B mit dem Koordinatenanfangspunkte O, so stellen die beiden Geraden die konstanten Widerstände bei J_{max} bzw. J_{min} dar, die proportional mit v abnehmen. Die Zickzacklinie $ACD \ldots O$ gibt dann direkt die Größe der einzelnen Widerstandsstufen an, wobei auch hier große Genauigkeit nicht erforderlich ist.

Man erkennt leicht, daß mit Hilfe dieser Methode eine Bremsung bis zum völligen Stillstande des Wagens nicht erreicht werden kann, weil nach Abschalten sämtlicher Stufen von W_b stets noch der Eigenwiderstand des Motors übrig bleibt. Es muß also noch eine mechanische Bremse (Handbremse) zur Hilfe genommen werden. Aber auch die Zahl der Schaltstufen wird reichlich groß. Man begnügt sich darum mit wenigen Stufen und bremst die restierende Geschwindigkeit der Wagen frühzeitiger mit der Handbremse ab.

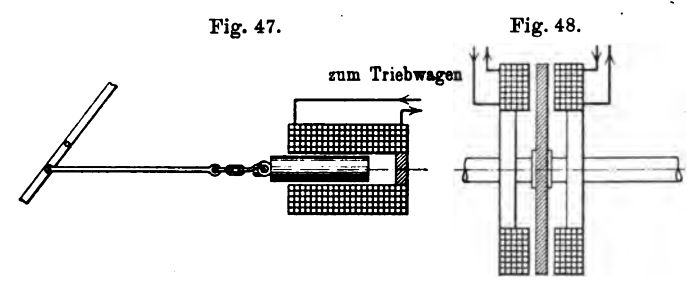
Die Nachteile dieses Bremssystems liegen, wie aus obigem unschwer zu ersehen ist, erstlich darin, die Wagen nicht vollkommen zum Stillstande bringen zu können. Hierzu tritt weiter die größere Dimensionierung der für Bremsschaltung zu verwendenden Motoren, die bedingt ist durch den geringen Eigenwiderstand, den dieselben zwecks möglichster Ausnutzung der Bremswirkung haben müssen und die starke Erwärmung der Wickelungen bei häufiger Benutzung. Um ein stoßfreies Arbeiten

zu erzielen, ist eine große Zahl von Widerstandsstufen erforderlich. Die Betriebssicherheit ist bei ausreichend dimensionierten Motoren eine genügende [1]).

Die Rückstrombremse. Dieselbe kommt vereinzelt als Notbremse in Anwendung. Es werden hierbei die Motoren einfach auf Rückwärtslauf geschaltet und bewirken so eine plötzliche Bremswirkung. Infolge der starken elektrischen und mechanischen Beanspruchung der Motoren einesteils und bei ungeschickter Handhabung anderenteils durch Gefährdung des rückwärtigen Straßenverkehrs ist diese Art der Bremsung heute in vielen Städten behördlicherseits verboten.

Die elektromagnetischen Bremsen. Der von den als Generatoren geschalteten Motoren erzeugte Strom kann weiter

Fig. 47. Fig. 48.



dazu verwendet werden, Elektromagnete zu erregen, die auf ein gewöhnliches Bremsgestänge wirken und so den Wagen mittels Reibung der Bremsklötze an den Rädern zum Stillstand bringen. Sie werden in der Hauptsache in Verbindung mit der Kurzschlußbremse als durchgehende Bremsen für Beiwagen benutzt und haben naturgemäß zahlreiche Ausführungsformen gefunden, von denen zwei häufiger zu findende Fälle in Fig. 47 und 48 schematisch und in Fig. 49 und 50 in praktischer Ausführung dargestellt sind. In Fig. 47 und 49 wird die Bremswirkung dadurch hervorgerufen, daß ein mit dem Bremsgestänge fest verbundener weicher Eisenkern in eine durch den Bremsstrom erregte Spule

[1]) Man hat versucht, den bei der Bremsung erzeugten Strom zur Heizung der Wagen zu verwerten, indem die Bremswiderstände in geeigneter Weise im Wageninneren untergebracht wurden, doch hat sich diese Anordnung neben der verwickelten Schaltung, der Feuersgefahr usw. wegen nicht eingebürgert.

gezogen wird und so die Bremsklötze an die Laufräder angelegt werden. Bei der in Fig. 48 und 50 gekennzeichneten Anordnung wird die Bremswirkung dadurch hervorgerufen, daß in einer auf die Radachse fest aufgesetzten Metallscheibe *B*, die zwischen

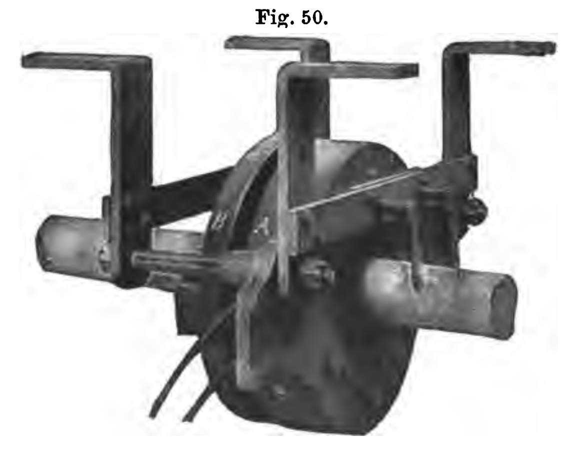
Fig. 49.



einem oder zwei durch den Bremsstrom erregten Elektromagneten *A* rotiert, Wirbelströme induziert werden.

Übereinstimmend mit den bei der Kurzschlußbremse angestellten Betrachtungen zeigt auch dieses Bremssystem den Nachteil, daß, wenn der Bremsstrom nur von den Wagenmotoren ent-

Fig. 50.



nommen werden soll, eine Bremsung bis zum völligen Stillstande der Wagen nicht erreicht werden kann, und man infolgedessen gezwungen ist, auch hier eine Handbremse zur Hilfe zu nehmen. Man kann sich jedoch bei diesem Bremssystem dadurch helfen, daß man mittels der letzten Bremskontakte die Bremsleitungen mit der Oberleitung verbindet und so Betriebsstrom benutzt. Um bei geringen Zuggeschwindigkeiten nur unter Verwendung des Motorstromes noch eine einigermaßen ausreichende Bremswirkung

zu erzielen, ist es erforderlich, den Eigenwiderstand der Bremsmagnetspulen so gering wie möglich zu bemessen. Die Betriebssicherheit ist eine gute, während das System an sich, namentlich bei den elektromagnetischen Scheibenbremsen, dauernde Wartung und Unterhaltung erfordert, ein Umstand, der naturgemäß auch nach Möglichkeit vermieden werden muß.

Die Schaltung für die Kurzschluß- und elektromagnetische Bremsung ist in Tafel I angegeben. Zur Erreichung möglichster Einfachheit in der Wagenausrüstung werden oft die Anfahrwiderstände so dimensioniert, daß sie als einzelne Stufen für die Bremsung Verwendung finden können. Der Anschluß der Bremsstromleitungen des Triebwagens an diejenigen der Beiwagen erfolgt mittels Anschlußdosen und Stöpseln und gut isolierter, gegen mechanische Beschädigungen geschützter Anschlußkabel, wie bereits vorher erwähnt und in Fig. 37 dargestellt.

Die Nutzbremsung. Wie schon des öfteren darauf hingewiesen, gestatten die Nebenschlußmotoren und asynchronen Drehstrommotoren eine Stromrückgewinnung, wenn sie über ihre normale Tourenzahl angetrieben werden. Man benutzt diesen Umstand vorteilhaft namentlich auf Gefällen zur Bremsung des Zuges. Beide Motortypen haben die Eigenschaft, in gleicher Drehrichtung auch als Generatoren zu laufen und so elektrische Energie zu erzeugen, die, in die Arbeitsleitung zurückgeschickt, zur Unterstützung der Stromlieferung des Kraftwerkes dienen kann.

Übersteigt beim Nebenschlußmotor in Gefällen angetrieben durch die lebendige Kraft der Fahrzeuge die Tourenzahl die normale Grenze, so ist er imstande, eine der Kontaktleitungsspannung gleiche oder größere Klemmenspannung zu erzeugen und so als parallel geschalteter Generator zu arbeiten. Die Spannungs- und demnach auch die Tourenregulierung erfolgt an den Sammelschienen des Kraftwerkes. Es wird also der Wagen oder Zug mit einer nur wenig von der normalen abweichenden Geschwindigkeit laufen und somit auf Gefällen gebremst werden. Der Wagenführer hat hierbei keinerlei Schalterbedienung vorzunehmen. Durch Meßinstrumente mit beiderseitigem Ausschlag ist man jederzeit in der Lage, zu beobachten, wann die Motoren als Generatoren laufen und eine Bremswirkung ausüben.

Um einen Überblick über die mögliche Stromrückgewinnung mit Nebenschlußmotoren auf Bergbahnen zu gewinnen, seien im

Folgenden Meßresultate wiedergegeben, die auf Strecken der Filderbahn [1]) aufgenommen worden sind. Demnach betrug die Stromrückgewinnung bei Talfahrt

im	Gefälle	von	108	$^0/_{00}$	etwa	55	Proz.
„	„	„	132	„	„	56	„
„	„	„	150	„	„	59	„
„	„	„	172	„	„	62	„

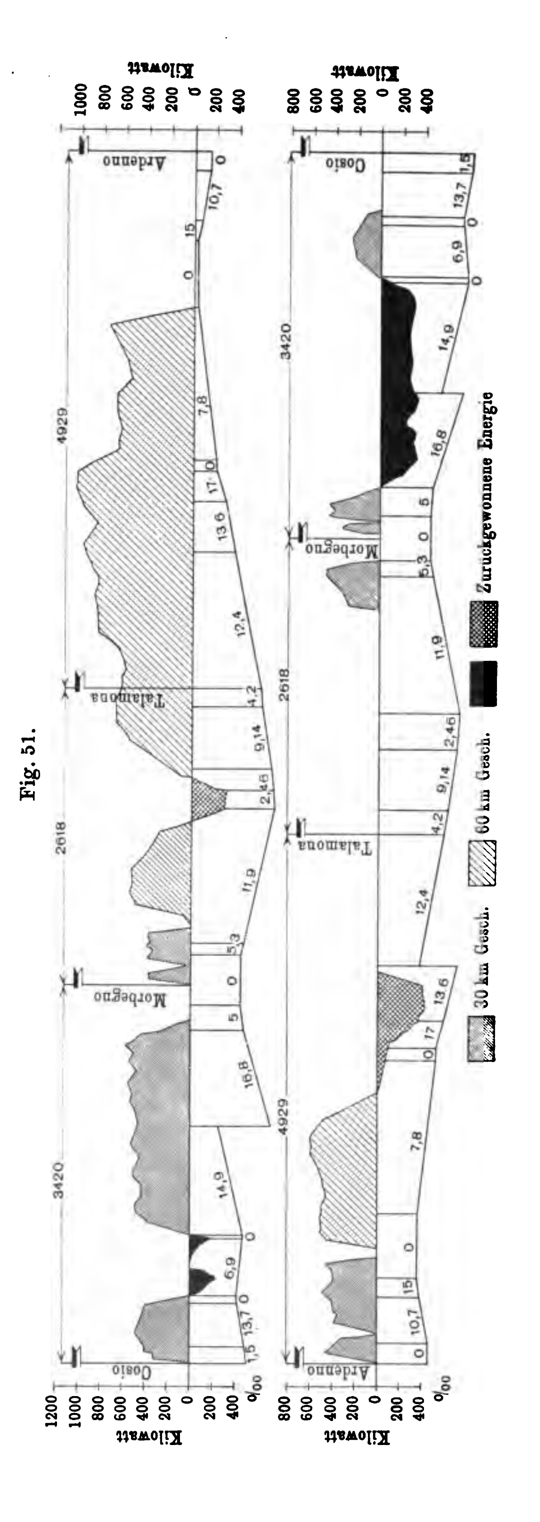
wobei die Werte auf den Beharrungszustand und die gerade Strecke bezogen sind. Die Aufnahmen erfolgten in der Weise, daß auf der gleichen Steigungsstrecke und Länge einmal bei Bergfahrt und einmal bei Talfahrt die Energieaufnahme bzw. Energierückgewinnung am Motorwagen gemessen wurde. Das Verhältnis der beiden so gefundenen Werte wurde dann als das Stromrückgewinnungsverhältnis in Prozenten berechnet. Man erkennt aus obiger Zusammenstellung leicht, daß bei ausgedehnteren Bergbahnanlagen die Rückgewinnung elektrischer Energie oder die sogenannte Nutzbremsung wohl volle Berücksichtigung verdient.

Die gleichen Betrachtungen, die für den Nebenschlußmotor angestellt wurden, gelten sinngemäß auch für den asynchronen Drehstrommotor, wenn derselbe im Gefälle übersynchron läuft. Bei Mehrmotorenwagen bietet jedoch, wie schon erwähnt, die Kaskadenschaltung noch eine weitere Möglichkeit, Bremswirkung und Stromlieferung zu erzielen. Läuft der Wagen mit normaler Geschwindigkeit bei parallel geschalteten Motoren und geht man plötzlich zur Kaskadenschaltung über, so wird bei beispielsweise zwei Motoren mit gleicher Polzahl der Triebwagen sofort bestrebt sein, nur mit halber Geschwindigkeit weiter zu laufen. Die Motoren werden infolgedessen so lange übersynchron angetrieben, bis dieselbe erreicht ist und wirken hierbei gleichzeitig bremsend und stromerzeugend.

Fig. 51 gibt ein Bild des Stromverlaufes für eine ganze Fahrt der neuen Lokomotiven der Veltlintalbahn, bei der auch die Kaskadenschaltung Anwendung findet auf der Strecke Cosio-Ardenno. Man ersieht hieraus, daß eine recht beträchtliche Stromrückgewinnung bei beiden Schaltungen praktisch möglich ist.

---

[1]) Vgl. Die elektrischen Bahnanlagen der Filderbahn, ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken; E. B. u. B. 1906, Heft 15 und 16.



Kilowatt
1200
1000
800
600
400
200
0
200
400
0/00
Cosio
Morbegno
Talamona
Ardenno
3420
2618
4929
1,5
13,7
0
6,9
14,9
16,8
5
5,3
11,9
2,46
9,14
4,2
12,4
13,6
17
7,8
15
10,7
30 km Gesch.
60 km Gesch.
Zuruckgewonnene Energie

Fig. 51.

Nur kurz soll darauf hingewiesen werden, daß heute für schwerere Motorwagen und in der Hauptsache bei Vorort-, Überland- und Vollbahnen die Bremsung mittels Luftdruck erfolgt und zwar durch ein besonderes Steuerventil, das neben dem Kontroller angeordnet ist Die Pumpen zur Erzeugung der komprimierten Luft sind im Wagenuntergestell untergebracht und werden von besonderen Elektromotoren angetrieben, für die der Strom der Fahrleitung direkt oder bei Wechsel- und Drehstrom hoher Spannung unter Zwischenschaltung eines Transformators entnommen wird (s. Tafel IV und V). Auf die praktische Ausführung der pneumatischen Bremsen soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

Viertes Kapitel.

Zugwiderstände und Kraftbedarf.

20. Die Zugwiderstände.

Die Grundlage für die Größenbestimmung der Motoren und des Kraftwerkes bildet die Ermittelung der auftretenden bzw. zu erwartenden Zugwiderstände und der hieraus resultierenden Zugkräfte und Leistungen. Bewegt sich ein Wagen oder Zug auf einer Bahn, so stellen sich der Bewegung desselben eine Reihe von Widerständen entgegen, die den Lauf des Wagens zu hindern suchen, und zu deren Überwindung demzufolge bestimmte Kräfte erforderlich sind. Diese Widerstände liegen teils in den Wagenteilen selbst, teils sind sie bedingt durch die Bahnanlage an und für sich, teils durch die Witterungsverhältnisse. Eine erschöpfende Berechnung aller auftretenden Widerstände ist nicht möglich, jedoch auch nicht erforderlich, weil die Verhältnisse, unter denen der Bahnbetrieb vor sich geht, überaus wechselnde sind und naturgemäß bei der Berechnung im voraus nicht bestimmt werden können. Die im Folgenden gemachten Angaben gründen sich daher auf zahlreiche neuere Versuchsergebnisse und sind für die

weitaus größte Zahl aller vorkommenden Fälle hinreichend genau und zuverlässig.

Die für die Berechnung zu berücksichtigenden Widerstände sind:

der Widerstand der Achslagerreibung w_a;
„ „ „ rollenden Reibung w_r;
„ Luftwiderstand w_l;
„ Widerstand in Kurven w_k;
„ „ „ Steigungen oder Gefällen $\pm w_s$;
„ „ infolge der Beschleunigung w_p.

Der Widerstand der Achslagerreibung w_a. Dieser Widerstand wird hervorgerufen durch die Reibung der Zapfen in ihren Lagern und ist somit für einen Beiwagen proportional dem auf der Achse ruhenden Gewichte G_1 (G_1 = Gesamtgewicht des Wagens abzüglich Gewicht der Radsätze) und einem Zapfenreibungskoeffizienten μ_1. Das auftretende Reibungsmoment ist, wenn r_z den Zapfenhalbmesser bezeichnet:

$$M = \mu_1 G_1 \cdot r_z.$$

Diesem Momente muß das Bewegungsmoment, bezogen auf den Auflagepunkt, das Gleichgewicht halten, so daß

$$w_a r_r = \mu_1 G_1 r_z,$$

wenn r_r den Radhalbmesser bezeichnet. Hieraus folgt:

$$w_a = \mu_1 G_1 \frac{r_z}{r_r}$$

$$= \mu_1 G_1 \frac{d_z}{d_r}, \quad \ldots \ldots \quad 31)$$

wenn statt der Halbmesser bequemer die Durchmesser d_z und d_r in Metern eingeführt werden.

μ_1 ist abhängig von der Art und Beschaffenheit der verwendeten Materialien, der Ölsorte, der Flächenpressung, der Geschwindigkeit und Lagertemperatur und kann etwa gesetzt werden nach Versuchen von Kirchweger[1])

für Flußstahl auf Hartblei oder
Kompositionslager . . . . $\mu_1 = 0{,}009$ bis 0,01
für Bronzelager . . . . $\mu_1 = 0{,}014$

[1]) Siehe Hütte, I. Teil.

Nach neuesten Versuchen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft bei hohen Geschwindigkeiten und vorzüglicher Schmierung ist:

$$\mu_1 = 0{,}015 \text{ bis } 0{,}02,$$

jedoch kann der Wert von μ_1 bei ungenügender Schmierung und Wartung bis auf 0,05 steigen. Für Motorwagen ist $d_r = 0{,}70$ bis 0,90 m, für Lokomotiven etwa 1,2 bis 1,6 m, so daß sich für das Verhältnis $\frac{d_z}{d_r}$ im Durchschnitt folgende Werte ergeben:

für Beiwagen	. . . . . .	0,07 bis 0,08
„ Motorwagen	. . . . .	0,10 „ 0,11
„ Lokomotiven	. . . . .	0,01 „ 0,06

Werden die Wagenachsen zur Motoraufhängung mitbenutzt, so vergrößert sich der Widerstand w_a um den Reibungswiderstand in den sogenannten Tatzenlagern der Motoraufhängung, und zwar wird, wenn G_m das auf den Wagenachsen ruhende Motorgewicht und d_a den Durchmessser der Wagenachse bezeichnet:

$$w_a G_1 = G_m \mu_1 \frac{d_a}{d_r} + (G_1 - G_m) \mu_1 \frac{d_z}{d_r}$$

oder

$$w_a = \mu_1 \left[\frac{d_z}{d_r} + \frac{G_m}{G_1}\left(\frac{d_a - d_z}{d_z}\right)\right] \quad . \; . \; . \; . \quad 32)$$

Es ist also der Widerstand für Wagen mit Motoren größer, und zwar etwa 1 bis 1,5 kg/t.

Der Widerstand der rollenden Reibung w_r. Zur Überwindung der Reibung der Räder auf den Schienen und der Spurkränze an den Schienen ist eine gewisse Zugkraft erforderlich, die bedingt ist durch den Widerstand, der sich der Bewegung entgegensetzt und proportional ist dem auf den Schienen ruhenden Gewichte G und einem Reibungskoeffizienten μ, so daß

$$w_r = \mu G = \mu (G_l + n G_w), \quad . \; . \; . \; . \quad 33)$$

wenn G_l das Lokomotivgewicht, n die Anzahl der Beiwagen und G_w das Wagengewicht plus Gewicht der Radsätze bedeutet. Nach Bödecker[1]) läßt sich w_r auch darstellen durch die Beziehung:

---

[1]) Bödecker, Wirkungen zwischen Rad und Schiene.

$$w_r = (G_l + G_w) \frac{k}{\sqrt{r_r}},$$

worin

$$k = 0{,}58 \text{ bis } 0{,}75 \text{ kg/t}.$$

Die so erhaltenen Werte entsprechen den aus praktischen Versuchen gefundenen jedoch nicht, denn $\mu = \frac{k}{\sqrt{r_r}}$ ist abhängig von dem Schienenprofil (Vignol- oder Rillenschienen), der Gleisanlage an sich und der Beschaffenheit der Schienenoberfläche und schwankt zwischen 1,5 bis 7 kg/t, je nachdem die Schienenoberfläche trocken, oder staubig, schmutzig und naß ist. Im Mittel rechnet man etwa mit $\mu = 3$ bis 5 kg/t, worin die Reibung der Spurkränze bereits mit enthalten ist.

Der Luftwiderstand w_l. Bewegt sich ein Wagen mit der Geschwindigkeit v, so muß eine gewisse Kraft aufgewendet werden, um einmal die vor der Wagenvorderfläche befindliche Luft zu zerteilen und dann die Reibung der Luft an den Seitenflächen der Wagen zu überwinden. Durch zahlreiche Versuche, die namentlich auch für hohe Geschwindigkeiten angestellt worden sind[1]), hat sich ergeben, daß der Luftwiderstand w_l proportional ist einem Reibungskoeffizienten μ_l, der Projektion der Vorderfläche des Wagens auf seine Querebene F qm und dem Quadrate der Geschwindigkeit v km/St. oder

$$w_l = \mu_l F . v^2 \text{ kg}, \quad \ldots \ldots \quad 34)$$

worin $\mu_l = 0{,}0052$ bis 0,0067 kg/qm,

$F \cong 6{,}2$ bis 6,8 qm für Straßenbahnen,

$\cong 9$ qm für Vollbahnen

zu setzen ist. Der kleinere Wert von μ_l gilt für geschlossene, der größere für mit offenem Vorderperron versehene Wagen. Bei Gegenwind kann μ_l bis um 10 Proz. steigen. Für Beiwagen erfährt μ_l durch die Luftreibung zwischen den einzelnen Wagen eine Vergrößerung von 10 bis 12 Proz., so daß bei n Beiwagen

$$w_l = \mu_l F (1 + 0{,}1\, n) v^2 \text{ kg} \quad \ldots \ldots \quad 35)$$

---

[1]) Franke, Neuere Ermittelungen über die Widerstände der Lokomotiven usw.; Mitteilungen über Forschungsarbeiten, vom Verein deutscher Ingenieure, Heft 11, 1903. Siemens-Schuckert-Werke, Versuche über elektrische Schnellbahnen; Allgem. Bauztg., Heft 11, 1904.

Die bisher betrachteten Widerstände w_a, w_r und w_l treten bei jeder Bewegung des Fahrzeuges auf gerader, ebener Bahn auf, sind mit ihm gewissermaßen untrennbar verbunden und können demzufolge als **fortdauernder Widerstand** w_1 bezeichnet werden, so daß

$$w_1 = w_a + w_r + w_l \text{ kg} \quad \ldots \ldots \quad 36)$$

pro 1 t Lokomotiv- oder Wagengewicht.

Die neuerdings von Franke für Dampflokomotiven und für durch Dampflokomotiven bewegte Wagenzüge ermittelten Werte für w_1 können ohne weiteres auch für elektrischen Betrieb verwendet werden. Franke gibt die auf S. 95 genannten Formeln an, die diagrammatisch für verschiedene Geschwindigkeiten von 0 bis 110 km/Std. in Fig. 52 aufgetragen sind und eine außerordentlich leichte Ermittelung von w_1 gestatten[1]):

Die nun weiter zu behandelnden Widerstände w_k, w_s und w_p treten nur vorübergehend und in bestimmten Fällen auf und können infolgedesen **„zusätzliche Widerstände"** genannt werden; sie bedingen oft eine erhebliche Vergrößerung von w_1.

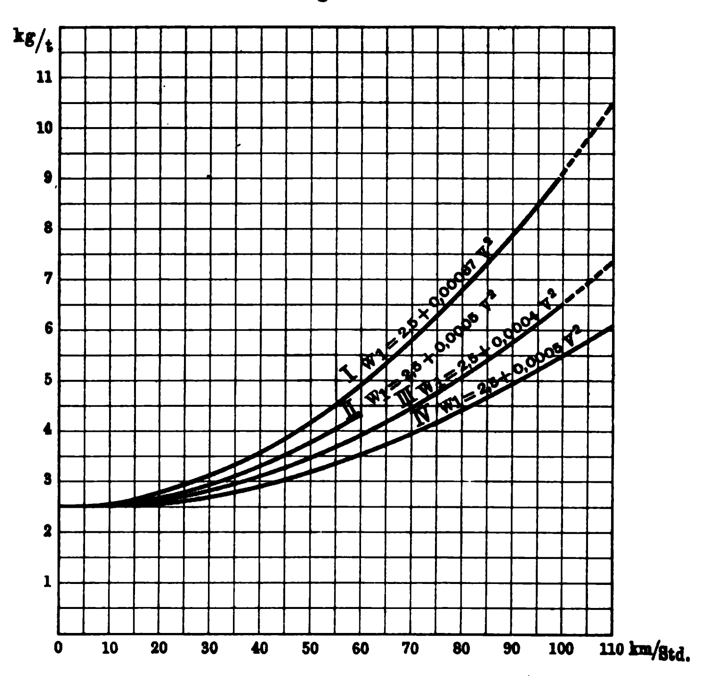
Der Widerstand in Kurven w_k. Beim Durchfahren einer Kurve werden die Spurkränze der inneren Räder vermehrt gegen die Schienen gepreßt, wodurch w_r vergrößert wird. Da ferner das äußere Rad einen längeren Weg, als das innere zurückzulegen hat, dieses aber naturgemäß nicht möglich ist, so wird ein Gleiten des inneren oder äußeren Rades oder beider gleichzeitig eintreten. Sind die Radachsen nicht in Drehgestellen gelagert, sondern starr mit dem Rahmen verbunden, so treten erhebliche Klemmungen zwischen Rad und Schiene auf, die um so größer sein werden, je größer der Radstand und je kleiner der Krümmungshalbmesser der Kurve ist. Der Widerstand w_k wird somit in der Hauptsache abhängen von dem Kurvenradius R,

---

[1]) Die für Dampflokomotiven oder durch dieselben fortbewegten Züge ermittelten Werte sind ohne weiteres auch für elektrisch angetriebene Fahrzeuge verwendbar, weil die durch die Dampfkolben bei abgestelltem Dampfzutritt für das Ansaugen und Fortschieben der Luft zu verrichtenden Arbeiten dadurch, daß man die Dampfverteilschieber entfernte, aufgehoben und so Saug- und Druckwirkung durch die Dampfkolben fast ganz vermieden wurde.



Fig. 52.



Widerstände von Lokomotiven und Wagenzügen auf gerader, wagerechter Bahn pro 1 t Zuggewicht.

I. Lokomotiven verschiedener Gattung;
II. Güterzüge, zusammengesetzt aus bedeckten, offenen, leeren und beladenen Wagen;
III. Personenzüge, Wagengewicht etwa 15 t;
IV. Personenzüge, Wagengewicht etwa 30 t (D-Züge).

w_1 kg $= 2{,}5 + 0{,}00067\, v^2$ km/Std. für 1 t Lokomotivgewicht;

w_1 kg $= 2{,}5 + 0{,}0005\, v^2$ „ für gemischte halbbeladene Güterzüge;

w_1 kg $= 2{,}5 + 0{,}0004\, v^2$ „ für Personen- und Schnellzüge mit einem Durchschnittsgewichte von 15 t pro Wagen;

w_1 kg $= 2{,}5 + 0{,}0003\, v^2$ „ desgleichen für ein solches von 30 t pro Wagen (D-Züge).

dem Radstande und der Spurweite. Praktische Versuche von v. Röckl[1]) haben folgende empirische Formeln ergeben:

Spurweite in Meter	w_k in kg/t		
	Hauptbahn	Nebenbahn	
1,435	$\frac{650}{R-60}$	$\frac{500}{R-30}$	. . 37a bis c)
1,000	—	$\frac{400}{R-20}$	
0,750	—	$\frac{350}{R-10}$	

Franke gibt für den Widerstand in Kurven folgende Gleichungen an, die deutlich w_k in Abhängigkeit vom Radstande b und dem Kurvenradius erkennen lassen. Es ist angenähert

$$\text{für Personenzüge } w_k = \left[0{,}18\frac{b}{R} - \left(\frac{b}{R}\right)^2\right] G \quad . . \ 38\text{ a)}$$

$$\text{für Güterzüge } w_k = \left[0{,}18\frac{b}{R} - 2\left(\frac{b}{R}\right)^2\right] G \quad . \ 38\text{ b)}$$

wobei für letztere eine doppelt so große Zugkraft vorausgesetzt ist, wie für erstere.

Der Widerstand in Steigungen oder Gefällen $\pm w_s$. Weist das Bahnprofil erhebliche Steigungen auf, so wird zum Widerstande w_1 noch derjenige hinzutreten, der hervorgerufen wird durch das Heben des Wagens auf eine gewisse Höhe h, d. h. die Schwerkraft. Schließt die Steigung mit der Horizontalen den Winkel α ein, so kann die Schwerkraft in zwei Komponenten zerlegt werden, $G \cos \alpha$ senkrecht und $G \sin \alpha$ in der Richtung der Bahnneigung (Fig. 53). Das für den Widerstand w_r in Frage kommende Gewicht reduziert sich um den Betrag $\cos \alpha$, wird trotz dessen aber voll in die Rechnung eingeführt, denn man setzt $\cos \alpha \cong 1$.

Der zusätzliche Widerstand w_s ergibt sich somit zu

$$w_s = \pm G \sin \alpha,$$

wobei das positive Zeichen für die Aufwärtsfahrt und das negative für die Fahrt im Gefälle zu nehmen ist. Es ist üblich geworden,

[1]) Hütte, II. Tl.

die Steigung in Promille (°/₀₀) anzugeben, d. h. die Höhe auf 1000 m horizontale Bahnlänge zu beziehen, und es folgt aus Fig. 53:

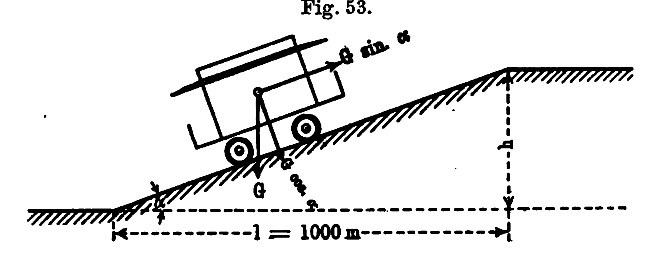
$$tg\,\alpha = \frac{h}{l} = \frac{h}{1000} = \pm s.$$

Wählt man mit hinreichender Genauigkeit $sin\,\alpha = tg\,\alpha$, so geht die Gleichung für w_s über in die Form

$$w_s = \pm G.s \quad \ldots \ldots \quad 39)$$

In Gefällen ist w_s negativ, und es kann somit der Fall eintreten, daß infolgedessen auch w_1 negativ wird. Es ist dann nicht nur der gesamte Bahnwiderstand aufgehoben, sondern er wird zur treibenden Kraft, der Wagen rollt also ohne angetrieben

Fig. 53.



zu werden das Gefälle hinab. Man benutzt diesen Umstand dazu, die Bahnmotoren anzutreiben und als Stromerzeuger wirken zu lassen, worauf jedoch erst später eingegangen werden soll.

Der Widerstand infolge der Beschleunigung w_p. Zu den bisher betrachteten Widerständen tritt im Augenblicke des Anfahrens noch ein weiterer hinzu, der seine Ursache in der Beschleunigung hat, die den Massen $\mathfrak{M}$ vom Momente der Ruhe bis zur Erreichung der vollen Geschwindigkeit erteilt werden muß. Ohne weiteres ist einzusehen, daß die Beschleunigung und demzufolge auch w_p keine konstante Größe sein kann und mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt.

Bezeichnet $\mathfrak{M}$ die zu beschleunigende Masse, $\frac{dv}{dt} = p$ in m/sec die Beschleunigung, G_t das Gesamtgewicht und g die Beschleunigung durch die Schwerkraft, so ist

$$w_p = \mathfrak{M} \cdot \frac{dv}{dt} = \mathfrak{M}.p$$

oder da

$$\mathfrak{M} = \frac{1000\,G}{g} = 1000\,\frac{G}{9{,}81}\,\text{kg},$$

so wird

$$w_p = 1000 \cdot \frac{G \,.\, p}{9{,}81}\,\text{kg}.$$

Rechnet man für den Widerstand der rotierenden Teile 15 Proz. Vergrößerung der Masse, so wird

$$w_p = 1150\,\frac{G \,.\, p}{9{,}81}\,\text{kg} \quad \ldots\ldots \quad 40)$$

Der **Gesamtwiderstand** w, der sich der Bewegung des Fahrzeuges unter den ungünstigsten Bedingungen entgegenstellen kann, setzt sich bei normalspurigem Gleise zusammen aus

$$w = w_1 + w_k + w_s + w_p$$
$$= \left(w_1 + \frac{650}{R-50} + s + \frac{1150 \,.\, p_a}{9{,}81}\right) G\ \text{kg} \quad . \ . \quad 41)$$

Es ist Gebrauch geworden, die in w_1 zusammengefaßten Widerstandsgrößen kurz mit dem Namen **Traktionskoeffizient** zu bezeichnen und hierfür eine aus zahlreichen Versuchen ermittelte Erfahrungsziffer pro 1 t Wagengewicht in die Rechnung einzuführen. Für normale Verhältnisse, wie sie auf gewöhnlichen Straßen-, Vorort- und Vollbahnen vorkommen, kann

$w_1 = 10$ bis 13 kg/t für Straßenbahnen mit Rillenschienengleise,
$w_1 = 5$ „ 8 „ für Vorort- und Vollbahnen mit eigenem Bahnkörper und Vignolschienen,

angenommen werden.

In manchen Fällen, namentlich aber bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, wird es sich jedoch empfehlen, die Widerstände der Reihe nach zu berechnen, wodurch die ganze Projektierung an Sicherheit gewinnt.

21. Die Zugkraft.

Die Zugkraft nun, die von den Achsentriebmotoren zur Fortbewegung des Wagens oder Zuges zu entwickeln ist, ist bedingt durch das auf den **Triebachsen ruhende Gewicht**, das sogenannte **Adhäsionsgewicht** G_a und den Widerstand zwischen

Rad und Schiene, der sich den angetriebenen, rollenden Rädern bis zum ins Gleitenkommen entgegensetzt. Man nennt diesen Widerstand die Adhäsion des Fahrzeuges und bezeichnet das Verhältnis von Adhäsion zu Adhäsionsgewicht mit Adhäsionskoeffizient $\mathfrak{a}$. Es muß daher, wenn G_a in t angegeben wird, die maximale Zugkraft

$$K_{max} \leqq 1000 \,.\, G_a \,.\, \mathfrak{a} \quad \ldots \ldots \quad 42)$$

sein.

Ist die Zugkraft größer, als die Adhäsion, so wird sich der Triebwagen nicht fortzubewegen vermögen, vielmehr werden die Räder auf der Stelle über die Schienenoberfläche gleiten ohne zu rollen; man sagt in diesem Falle, die Räder „schleudern".

Der Adhäsionskoeffizient kann angenommen werden zu

$$\mathfrak{a} = 0{,}15 \text{ bis } 0{,}3,$$

wobei der größere Wert für neues, bzw. gut unterhaltenes Gleis und Rollmaterial gilt. Durch Sandstreuen oder bei Bergbahnen besser noch durch direktes pneumatisches Einblasen von Sand zwischen Rad und Schiene läßt sich $\mathfrak{a}$ bedeutend erhöhen, etwa bis 0,5, während bei schlüpfriger oder nasser Oberflächenbeschaffenheit der Schienen $\mathfrak{a}$ bis auf 0,1 sinken kann. Das Adhäsionsgewicht G_a kann durch Kuppeln der Triebachsen mit den Laufachsen vermehrt werden, wie dieses bei Dampflokomotiven und beispielsweise bei den elektrischen Lokomotiven der Valtelintalbahn und Simplonbahn [1]) der Fall ist.

Soll nun auf einer maximalen Steigung s in einer Kurve angefahren werden, so muß z. B. bei normalspuriger Gleisanlage

$$K_{max} \leqq 1000 \,.\, G_a \,.\, \mathfrak{a} \geqq \left(w_1 + s + \frac{650}{R - 50} + \frac{1150 \,.\, p_a}{9{,}81}\right) G \quad 43\text{a})$$

worin

$$G = G_l + n \,.\, G_w$$

und G_l das Gewicht des Triebwagens bezeichnet, so daß also

$$K_{max} \leqq 1000\, G_a \,.\, \mathfrak{a}$$

$$\geqq \left(w_1 + s + \frac{650}{R - 50} + \frac{1150 \,.\, p_a}{9{,}81}\right) \cdot (G_l + n\, G_w) \quad . \; . \quad 43\text{b})$$

---

[1]) Anordnung von Brown-Boveri & Cie. und Ganz & Co.



Aus Gleichung 43) folgt, daß durch die Adhäsion die bei einem bestimmten Adhäsionsgewichte mit genügender Sicherheit zu befahrende maximale Steigung gegeben ist, wenn nicht die Triebwagen, bzw. der Achsdruck pro angetriebene Wagenachse (etwa normal 14 bis 16 t pro Achse), unverhältnismäßig hoch gewählt wird. Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, daß in letzterem Falle der Kilowattstundenverbrauch pro 1 t km Nutzlast im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch durch das vergrößerte tote Gewicht ein wesentlich höherer wird, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Betriebes beeinträchtigt werden kann. Gleichung 43) gibt weiter an, mit welcher Beschleunigung, oder ob überhaupt auf der maximalen Steigung angefahren werden kann, eventuell selbst unter Berücksichtigung der Sandstreuung. Es sind dieses Untersuchungen, die für jedes Projekt einer größeren Bahnanlage durchgeführt werden müssen, weil sie in den häufigsten Fällen mit unter die zu übernehmenden Garantien fallen.

Für die freie Fahrt lauten die Gleichungen aus Gleichung 43) für die Zugkraft

in der Steigung $+ s\,.\,{}^0/_{00}$

$$K = (w_1 + s)\,.\,G \qquad 44)$$

und im Gefälle $- s\,.\,{}^0/_{00}$

$$K = (w_1 - s)\,.\,G \qquad 45)$$

Wird s größer als w_1, so wird K negativ, d. h. die Motoren haben keine Zugkraft mehr zu entwickeln, sondern die lebendige Kraft des Wagens ist allein imstande, den Bahnwiderstand zu überwinden.

22. Die Größenbestimmung der Motoren.

Für die Größenbestimmung der Motoren ist K_{max} nach Gleichung 43) maßgebend, aus der sich bei z einzubauenden Motoren die Leistung pro Motor in PS ergibt zu

$$P_n = \frac{K_{max}\, v_{\mathrm{km/St.}}}{z\,.\,3{,}6\,.\,75\,.\,\eta_M} \qquad 46)$$

die jedoch nicht als die normale Dauerleistung, sondern unter Berücksichtigung der während einer bestimmten Zeit zulässigen Überlastungsfähigkeit der Motoren als Maximalleistung anzusehen

ist. Aus der Zeitkurve für die Temperaturerhöhung (Fig. 15) kann die maximal zulässige Zugkraft der Motoren mit Rücksicht auf ihre Erwärmung leicht ermittelt werden.

Einen weiteren wesentlichen Faktor für die Größe der Motoren bildet also die Erwärmung derselben, worauf schon im Anfang des zweiten Kapitels besonders hingewiesen wurde. Da der Bahnmotor in den weitaus häufigsten Fällen mit vollkommen geschlossenem Gehäuse ausgeführt wird, um ihn vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen, so wird die durch die Verluste in den Wickelungen, dem Eisen usw. des Motors, sowie die durch Reibung erzeugte Wärme nur schwer durch die Oberfläche des Motorgehäuses ausgestrahlt, also abgeführt werden können.

Im allgemeinen kann man etwa die gesamten, in einem Augenblicke auftretenden Verluste ausdrücken durch die Gleichung 47):

$$V_e = \frac{J^2 \, . \, W_g}{0{,}97} \quad \dots\dots\dots \quad 47)$$

woraus man erkennt, daß dieselben proportional mit dem Quadrate der Stromstärke wachsen. Die Verwendbarkeit und Betriebssicherheit eines Bahnmotors wird demnach in hohem Maße auch von seiner Erwärmung abhängen. Letztere wird also mit Rücksicht auf die Dauerleistung zu untersuchen sein. Als Dauerleistung ist nun diejenige anzusehen, die der Motor während der ganzen Betriebszeit herzugeben imstande ist und wird gefunden aus den Einzelleistungen in Kilowattsekunden, dividiert durch die Gesamtbetriebszeit in Sekunden.

Bezeichnet

$P_e . t$ die Einzelleistungen in Kilowattsekunden,
T die gesamte Betriebszeit in Stunden,
$V_e . t$ die Einzelverluste in Kilowattsekunden,
P_d die Dauerleistung,
V_d die Verluste, die bei der Dauerleistung auftreten, in Kilowatt,

so ist

$$P_d = \frac{\Sigma \, (P_e . t)}{3600 \, . \, T}$$

$$V_d = \frac{\Sigma \, (V_e t)}{3600 \, . \, T} = \frac{\Sigma \, (J_e^2 . t) \, . \, W_g}{3492 \, . \, T}.$$

Mit genügender Genauigkeit läßt sich nun, um umständliche Rechnungen zu vermeiden, die mittlere Dauerleistung aus der mittleren Stromstärke bestimmen und zwar ist

$$J_d = \sqrt{\frac{\Sigma\,(J_e^2 \,.\, t)}{3600 \,.\, T'}},$$

wenn

J_d die mittlere Dauerstromstärke,
J_e die Einzelstromstärke,
t die gesamte Zeit in Sekunden, während welcher der Motor Strom erhält,
T' die Zeit in Stunden für eine volle Hin- und Rückfahrt einschließlich der Aufenthaltszeit auf den Endstationen

bedeutet.

Der Verband deutscher Elektrotechniker schreibt in seinen „Normalien für Leistung, Temperaturzunahme und Überlastungsfähigkeiten für Generatoren, Motoren usw." in § 15 und 16 vor, daß bei Straßenbahnmotoren nach einstündigem ununterbrochenem Betriebe die mit normaler Belastung im Versuchsraume ermittelte Temperaturzunahme folgende Werte nicht übersteigen darf:

a) an isolierten Wickelungen und Schleifringen bei Baumwollisolierung . . . . 70° C
an isolierten Wickelungen und Schleifringen bei Papierisolierung . . . . 80° „
an isolierten Wickelungen und Schleifringen bei Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . . . . 100° „

Eine Erhöhung dieser Grenzen für ruhende Wickelungen ist nicht zulässig.

b) an Kollektoren . . . . 80° C
c) an Eisen, in das Wickelungen eingebettet sind, je nach der Isolierung der Wickelung Werte unter a.

Bei kombinierten Isolierungen gilt die untere Grenze.

Somit wird also ein Vergleich zwischen Dauerleistung und Stundenleistung angestellt werden müssen, da eine Prüfung mit der Dauerleistung im Prüffelde umständlich und schwer aus-

zuführen ist. Unter **Stundenleistung** ist nun diejenige Leistung zu verstehen, die der Motor eine Stunde lang herzugeben vermag, ohne daß hierbei die Temperaturzunahme seiner einzelnen Teile die obengenannten Werte bei einer **Lufttemperatur von** 35° C übersteigen darf. Die Stundenleistung beträgt auf Grund praktischer Versuche etwa das 2,5- bis 3-fache der Dauerleistung, wobei der letztere Wert für größere Motoren zu wählen ist.

Die Gleichstrom-Nebenschlußmotoren und die Drehstrommotoren sind hingegen so zu dimensionieren, daß sie unter Einschluß der Überlastungsfähigkeit und Erwärmung bei normaler, in diesem Falle also maximaler Geschwindigkeit und auf der größten vorkommenden Steigung das vorgeschriebene Maximalgewicht befördern können.

Bei Hauptstrommotoren läßt sich mit Hilfe der Reihenparallelschaltung eine Änderung in Geschwindigkeit und Zugkraft (vgl. drittes Kapitel) erreichen. Man wird die Reihenschaltung auf starken Steigungen anwenden, um einesteils dem Triebwagen erhöhte Zugkraft bei verminderter Geschwindigkeit zu verleihen und weiter die Stromstärke zu vermindern, während die Parallelschaltung auf ebenen Strecken und weniger starken Steigungen von Vorteil ist, um durch gesteigerte Fahrgeschwindigkeit die Fahrzeit abzukürzen. Es läßt sich so bei genügender Schulung der Wagenführer ein guter, wirtschaftlicher Betrieb durchführen.

Weiter ist von Interesse, die **KW-Stunden pro t km** zu kennen, um hieraus die Höhe der Selbstkosten und die Fahrpreise berechnen zu können. An den Wagenachsen ist eine elektrische Arbeit A zu leisten von

$$A = \frac{w \, . \, G \, . \, v}{75 \, . \, 3{,}6} \, 0{,}736 \text{ KW} \quad \ldots \ldots \quad 48)$$

und es folgt somit die Leistung pro t km Zuggewicht zu

$$A_1 = \frac{w}{75 \, . \, 3{,}6} \, 0{,}736 \text{ KW-St./t km} \quad \ldots \quad 49\,a)$$

Besonders zu berücksichtigen ist noch der Arbeitsaufwand für die Anfahrperiode, der sich aus Gleichung 43) leicht finden läßt. Es ist

$$A_a = \frac{w_1 + \frac{1150 \, . \, p_a}{9{,}81}}{75 \, . \, 3{,}6} \cdot 0{,}736 \, . \, v \, . \, G \text{ KW}.$$

Auch der KW-St.-Verbrauch pro t km Nutzlast läßt sich in einfacher Weise finden; bezeichnet G_p das Gesamtgewicht der Nutzlast, also Gewicht der Passagiere und der Frachtgüter und η_g den Nutzeffekt

$$\eta_g = \frac{G_p}{G},$$

so ist

$$A_1' = \frac{w}{75 \cdot 3{,}6\, \eta_g} \cdot 0{,}736 \text{ KW-St./tkm} \quad . \quad . \quad . \quad 49\text{b})$$

23. Die Arbeitsrückgewinnung.

Nicht unerörtert soll die Arbeitsrückgewinnung bleiben, die, wie schon erwähnt, bei Gleichstrom-Nebenschlußmotoren und asynchronen Drehstrommotoren ohne Schwierigkeit möglich und vereinzelt zur Anwendung gekommen ist. Man ist so in der günstigen Lage, die Kraftstation durch den von den talwärtsfahrenden Triebwagen erzeugten Strom in der Energielieferung für die bergwärtsfahrenden Wagen zu unterstützen und durch entsprechende Größe des Kraftwerkes einen wesentlich günstigeren Belastungsfaktor zu erzielen.

Wird im Gefälle nach Gleichung 45)

$$K = (w_1 - s)\, G,$$

die Zugkraft negativ, so sind die Motoren imstande, als Stromerzeuger zu arbeiten.

Die für das Befahren einer Steigung s bei einer Länge L_s von der Kraftstation zu leistende elektrische Arbeit ist:

$$A_{+s} = \frac{(s + w_1)\, G \,.\, L_s}{75 \,.\, 3{,}6 \,.\, \eta_1} 0{,}736 \text{ KW-St.} \quad . \quad . \quad 50\text{a})$$

worin η_1 den Wirkungsgrad der Motoren und der gesamten Leitungsanlage bedeutet, also $\eta_1 = \eta_M \eta_L$ ($\eta_L = 0{,}75$ bis $0{,}95$).

Beim Hinabfahren der gleichen Steigung kann demzufolge eine elektrische Arbeit zurückgewonnen werden von

$$A_{-s} = \frac{(s - w_1)\, G \,.\, L_s \eta_2}{75 \,.\, 3{,}6} 0{,}736 \text{ KW-St.} \quad . \quad . \quad 50\text{b})$$

Setzt man mit hinreichender Genauigkeit $\eta_2 \cong \eta_1 \cong \eta$, so

ist die prozentuale Arbeitsrückgewinnung das Verhältnis der zurückgegebenen zur aufgenommenen Arbeit und zwar:

$$\frac{A_{-s}}{A_{+s}} \, \% = \frac{s - w_1}{s + w_1} \, \eta^2 . 100 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 51)$$

Bei Drehstrommotoren tritt noch eine weitere Möglichkeit der Arbeitsrückgewinnung durch die im dritten Kapitel erläuterte Kaskadenbremsung ein, so daß hier die Triebwagen schon auf ebener Strecke zur Stromlieferung herangezogen werden können.

Bei ausgedehnteren Bergbahnanlagen wird sich für die Bestimmung des KW-St.-Verbrauches eine diesbezügliche Durchrechnung an Hand des Fahrplanes (vgl. fünftes Kapitel) stets empfehlen. Es wird eine Stromunterstützung seitens der talwärtsfahrenden Wagen aus leicht erklärlichen Gründen jedoch nur für die sich in der Nähe derselben befindenden bergwärtsfahrenden Züge eintreten.

Tabelle.

Stations-bezeichnung von — bis — Stations-entfernung	Länge der Strecke L_s in m	Steigung oder Gefälle $\pm s$ ‰	Zugkraft $\pm K = \left(w_1 \pm s + \frac{1150 . p_a}{g}\right) G$ in kg	Geschwindigkeit v in km/St.	Fahrzeit $t = \frac{v}{L_s}$ in sec.	Stromstärke J Amp.	Bemerkungen: Schaltung der Motoren. KW-St./t km n. Gl. 49 a). KW-St./t km n. Gl. 49 b) usw.
			Mittlere Zugkraft	Mittlere Geschw. v_1	$\frac{\Sigma t}{60}$ Min.		

Um einen Überblick über Geschwindigkeit, benötigte Stromstärke und Zugkraft auf der ganzen Strecke zu erhalten und weiter die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit, aufzuwendenden Energie, der Fahrzeiten usw. zu erleichtern, stellt man für die ganze Strecke zweckmäßig die vorstehende Tabelle auf und entwirft ein Diagramm Tafel VI, was mit Hilfe der charakteristischen Kurven der Achsentriebmotoren leicht bewerkstelligt werden kann. Die Tabelle ist für jeden Streckenabschnitt zu berechnen und gestattet dann eine sofortige Ermittelung der mittleren Werte von K und v, sowie der gesamten Fahrzeit, des Energieverbrauches, der zurückgewonnenen Energie usw.

In Tafel VI ist die Tabelle graphisch zur Darstellung gebracht und gezeigt, wie übersichtlich für jeden Punkt des Höhenprofils alles Wissenswerte ohne Schwierigkeit bestimmbar ist. Es ist hier der Deutlichkeit wegen nur die Kurve des Stromverbrauches für eine Hinfahrt gezeichnet, und sind die Kurven für K, v und J für Hin- und Rückfahrt entsprechend einzutragen. An Hand des im fünften Kapitel erläuterten Fahrplanes ist dann auch die Bestimmung der Größe des Kraftwerkes auf einfache Art möglich.

Fünftes Kapitel.

Die Aufstellung des Fahrplanes.

24. Aufstellung des Fahrplanes.

Nachdem im vierten Kapitel gezeigt worden ist, wie die Geschwindigkeiten und die Zugkräfte für jeden Punkt der Strecke mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden können, soll im Folgenden der Fahrplan aufgestellt werden, der für die ganze Projektbearbeitung, für die Bestimmung des Wagenparkes und in der Hauptsache für die Größe des Kraftwerkes von höchster Bedeutung ist. Mit Hilfe desselben können weiter die Querschnitte der Arbeits- und Speiseleitungen berechnet, sowie auf Grund

desselben ein regelmäßiger und geordneter Betrieb durchgeführt werden.

Für die Aufstellung des Fahrplanes ist in erster Linie die in Aussicht genommene Betriebsführung maßgebend, denn es ist einleuchtend, daß der Fahrplan für eine Straßenbahn nach wesentlich anderen Gesichtspunkten zu entwerfen sein wird, als derjenige für eine Vollbahn. Um jedoch einen in jeder Beziehung zweckentsprechenden und verläßlichen Fahrplan zu erhalten, müssen noch bekannt sein:

das Höhenprofil der zu befahrenden Strecke; die mittlere Geschwindigkeit v_m zwischen zwei Haltepunkten;

die maximale Fahrgeschwindigkeit v; die Verkehrsdichte, d. h. die Aufeinanderfolge der Wagen bzw. Züge;

die Lage und die Zahl der Haltestellen; die ganze Fahrzeit bzw. die Dauer des gewünschten Aufenthaltes.

Von vorherein ist jedoch hier der schon im ersten Kapitel erwähnte Unterschied in der Betriebsführung zu machen, und zwar ob der Betrieb als straßenbahnähnlicher oder vollbahnähnlicher durchgeführt werden soll. Bei ersterem ist die Entfernung zwischen zwei Haltestellen klein, der Aufenthalt auf denselben kurz und die Reisegeschwindigkeit selten über etwa 25 bis 30 km pro Stunde. Es wird dadurch ein möglichst rasches Anfahren zur Bedingung, um einesteils die häufiger auftretenden Anfahrverluste zu vermeiden und bald die Maximalgeschwindigkeit zu erreichen, bei der die Motoren am wirtschaftlichsten arbeiten, anderenteils um einen möglichst langen stromlosen Auslauf des Wagens zu erzielen, damit die lebendige Kraft desselben nicht unnötig frühzeitig abgebremst werden muß.

Dahingegen sind beim Vollbahnbetriebe die Entfernungen zwischen den einzelnen Stationen und die Geschwindigkeiten erheblich größere, die Haltezeiten von längerer Dauer und ein genaues Einhalten des Fahrplanes Bedingung, welch' letzteres für den gesamten Betrieb mit Rücksicht auf die notwendige Sicherheit unbedingt erforderlich ist.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die Züge zwischen zwei Haltepunkten bzw. zwischen den Endpunkten der Strecke verkehren, ist eine durchaus veränderliche Größe und abhängig von mannigfachen Ursachen, so daß ihre rechnerische Ermittelung

lange und sichere Überlegungen erfordert. Dieselben sind jedoch für die Praxis unzweckmäßig und zeitraubend, da nicht nur das wechselnde Profil und die jeweilige Belastung, sondern namentlich auch die Geschicklichkeit des Wagenführers in Betracht zu ziehen sind.

Bezeichnet

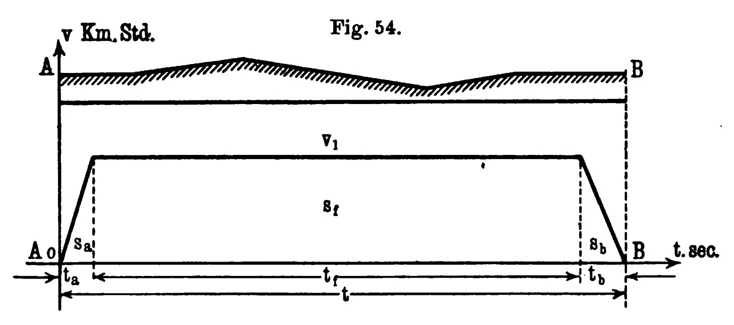
v_m die mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Haltestellen;

v_c die mittlere Geschwindigkeit mit Berücksichtigung der Haltezeiten (kommerzielle Geschwindigkeit);

v_1 die mittlere Geschwindigkeit bei voller Fahrt,

so setzt sich v_m zusammen aus der Geschwindigkeit während des Anfahrens, während der eigentlichen Fahrt und beim Bremsen.

Fig. 54.



In Fig. 54 seien A und B zwei Haltestellen, und das Profil der Strecke werde dargestellt durch den Linienzug AB. Wie im vierten Kapitel gezeigt, wird v_1 mit Hilfe der Tabelle ermittelt und die Fahrzeit t_f in Sekunden bestimmt. Zu t_f sind nun zu addieren die Zeiten für das Anfahren t_a und das Bremsen t_b, so daß die ganze Fahrzeit

$$t = t_a + t_f + t_b.$$

Kennt man p_a die Anfahrbeschleunigung, p_b die Verzögerung beim Bremsen, s_a und s_b die entsprechenden Weglängen, so ist

$$p_a = \frac{v_1}{t_a} = \frac{v_1}{3600 \, . \, t_a} \text{ km/Std.} \quad . \quad . \quad . \quad 52\text{a})$$

$$p_b = \frac{v_1}{t_b} = \frac{v_1}{3600 \, . \, t_b} \text{ km/Std.} \quad . \quad . \quad . \quad 52\text{b})$$

und aus der Fig. 54

$$\text{der Anfahrweg } s_a = \frac{t_a \cdot v_1}{2} \quad \ldots\ldots \quad 53\text{a)}$$

$$\text{der Bremsweg } s_b = \frac{t_b \cdot v_1}{2} \quad \ldots\ldots \quad 53\text{b)}$$

Es ergibt sich somit unter Berücksichtigung der Gleichungen 52) und 53) der gesamte zurückgelegte Weg

$$s = s_a + s_f + s_b = v_1 \cdot \left(\frac{v_1}{7200 \cdot p_a} + t_f + \frac{v_1}{7200 \cdot p_b} \right) \cdot \cdot \quad 54)$$

bzw. die ganze Fahrzeit

$$t = t_f + \frac{v_1}{3600} \cdot \left(\frac{1}{p_a} + \frac{1}{p_b} \right) \quad \ldots\ldots \quad 55)$$

Nun ist die mittlere Geschwindigkeit v_m gleich dem Produkte aus Gesamtweg und Gesamtzeit, also

$$v_m = \frac{s}{t_f + \frac{v_1}{3600} \cdot \left(\frac{1}{p_a} + \frac{1}{p_b} \right)} \quad \ldots\ldots \quad 56)$$

Bei Straßenbahnen oder straßenbahnähnlichem Betriebe, bei welchem der Aufenthalt auf den einzelnen Haltepunkten nur nach Sekunden zu zählen ist und dem augenblicklichen Verkehrsverhältnis angepaßt werden muß, legt man dem Fahrplane nicht die mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Haltepunkten v_m zugrunde, sondern diejenige zwischen zwei Endpunkten der Strecke einschließlich der Berücksichtigung der Haltezeiten; man nennt diese die kommerzielle Geschwindigkeit v_c.

Gibt b die Anzahl der Haltestellen und t_h die Haltezeit in Sekunden an, so ist

$$v_c = \frac{s}{t + b \cdot t_h} = v_m \cdot \frac{1}{1 + \frac{v_m \cdot b \cdot t_h}{s}} \text{ km/Std.} \quad \ldots \quad 57)$$

Die einzelnen Werte von t_h sind natürlich nicht mit Sicherheit anzugeben. Man schätzt sie daher aus dem Mittel der bei normalem Verkehr zu erwartenden Haltezeiten.

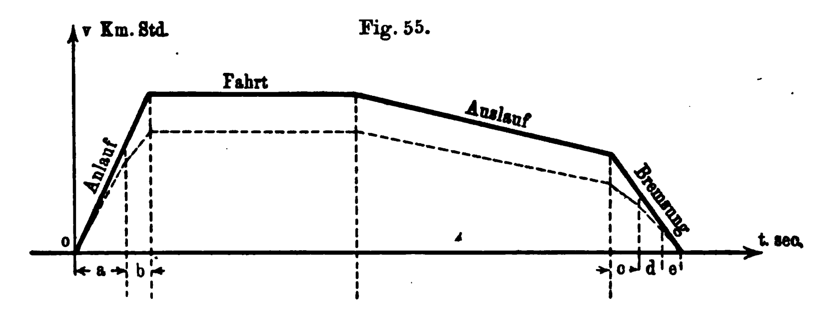
Für die Aufstellung des Fahrplanes bei Vollbahnbetrieb bedient man sich nur der mittleren Geschwindigkeit v_m, wenn gewisse Haltezeiten vorgeschrieben sind. Ist letzteres nicht der Fall,

soll vielmehr eine vorgeschriebene Strecke in einer festgesetzten Zeit zurückgelegt werden, so berechnet man Σv_m zwischen den Endpunkten der Strecke, bestimmt die Gesamtfahrzeit t, vergleicht diese mit der einzuhaltenden und verteilt die restierende Zeit als Aufenthalt auf die einzelnen Stationen unter Berücksichtigung ihrer Größe.

25. Das Fahrdiagramm.

Zur Ermittelung von Garantiewerten für Stromverbrauch usw. entwirft man ein vollständiges Fahrdiagramm für die einzelnen Perioden einer vollen Fahrt zwischen zwei Haltestellen (Fig. 55) und berechnet mit Hilfe des Vorhergesagten und der charakteristischen Kurven der einzubauenden Motoren die verlangten Größen

Fig. 55.



aus demselben. Man gewinnt so ein klares Bild über den Verlauf der Fahrt zwischen den betrachteten Haltestellen.

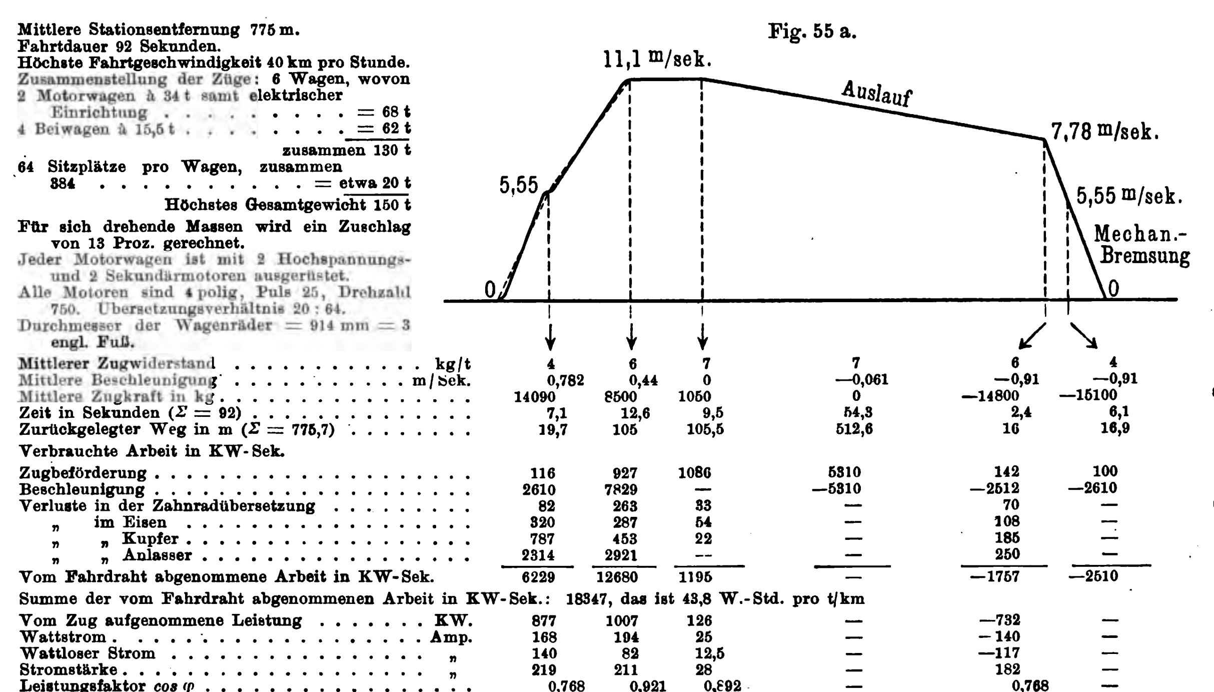
Wird Reihen-Parallelschaltung oder bei Drehstrom Kaskadenschaltung angewendet, so ändert sich das Diagramm in „Anfahrt“ und „Bremsung“, was unschwer selbst erkannt werden kann und in Fig. 55 angedeutet ist.

Zur Vervollständigung der über die Aufstellung des Fahrdiagramms gemachten Erklärungen ist in Fig. 55 a der Entwurf eines solchen wiedergegeben, wie er seinerzeit für die Londoner Untergrundbahn von der Firma Ganz & Co. vorgeschlagen wurde. Die beigegebenen Zahlen geben zu erkennen, mit welcher Sorgfalt Garantiewerte bestimmt werden müssen, und welche leichte und bequeme Übersicht über die Vorgänge während der Fahrt ein derartiges Diagramm gestattet.

Fig. 55 a.

Mittlere Stationsentfernung 775 m.
Fahrtdauer 92 Sekunden.
Höchste Fahrtgeschwindigkeit 40 km pro Stunde.
Zusammenstellung der Züge: 6 Wagen, wovon
2 Motorwagen à 34 t samt elektrischer Einrichtung . . . . = 68 t
4 Beiwagen à 15,5 t . . . . = 62 t
zusammen 130 t
64 Sitzplätze pro Wagen, zusammen 384 . . . . = etwa 20 t
Höchstes Gesamtgewicht 150 t

Für sich drehende Massen wird ein Zuschlag von 13 Proz. gerechnet.
Jeder Motorwagen ist mit 2 Hochspannungs- und 2 Sekundärmotoren ausgerüstet.
Alle Motoren sind 4 polig, Puls 25, Drehzahl 750. Übersetzungsverhältnis 20 : 64.
Durchmesser der Wagenräder = 914 mm = 3 engl. Fuß.



Mittlerer Zugwiderstand . . . kg/t	4	6	7	7	6	4
Mittlere Beschleunigung . . . m/Sek.	0,782	0,44	0	—0,061	—0,91	—0,91
Mittlere Zugkraft in kg . . .	14090	8500	1050	0	—14800	—15100
Zeit in Sekunden ($\Sigma = 92$) . . .	7,1	12,6	9,5	54,3	2,4	6,1
Zurückgelegter Weg in m ($\Sigma = 775,7$) . . .	19,7	105	105,5	512,6	16	16,9
Verbrauchte Arbeit in KW-Sek.						
Zugbeförderung . . .	116	927	1086	5310	142	100
Beschleunigung . . .	2610	7829	—	—5310	—2512	—2610
Verluste in der Zahnradübersetzung . . .	82	263	33	—	70	—
„ im Eisen . . .	320	287	54	—	108	—
„ „ Kupfer . . .	787	453	22	—	185	—
„ „ Anlasser . . .	2314	2921	—	—	250	—
Vom Fahrdraht abgenommene Arbeit in KW-Sek.	6229	12680	1195	—	—1757	—2510

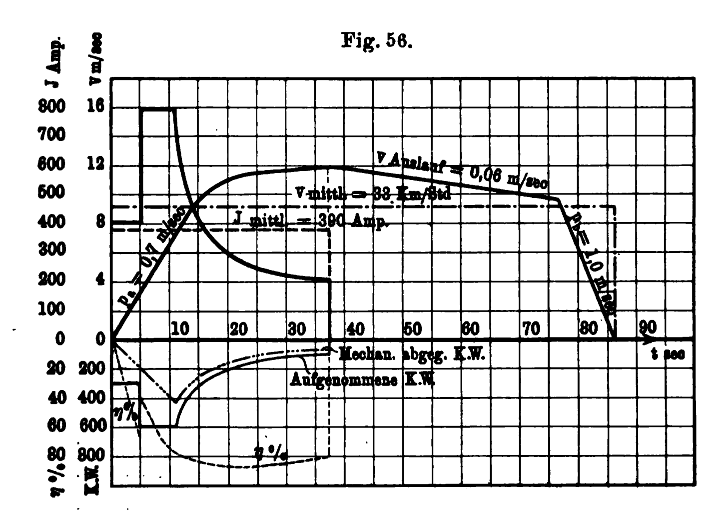
Summe der vom Fahrdraht abgenommenen Arbeit in KW-Sek.: 18347, das ist 43,8 W.-Std. pro t/km

Vom Zug aufgenommene Leistung . . . KW.	877	1007	126	—	—732	—
Wattstrom . . . Amp.	168	194	25	—	— 140	—
Wattloser Strom . . . „	140	82	12,5	—	—117	—
Stromstärke . . . „	219	211	28	—	182	—
Leistungsfaktor $\cos \varphi$ . . .	0,768	0,921	0,892	—	0,768	—
Watt-Amp.-Sek. . . .	1193	2445	237	—	—336	—
Wattlose Amp.-Sek. . . .	994	1033	119	—	280	—

Summe: Watt-Amp.-Sek. = 3539. Wattlose Amp.-Sek. = 2426.
Mittelwerte: Wattstrom 31,6 Amp. Wattloser Strom 21,6 Amp. Stromstärke 38,3 Amp.
Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,825$. Leistung 164 KW.

Da die Fahrdiagramme eine wesentliche Rolle bei der Projektierung spielen, sind in Fig. 56 und 57 noch zwei weitere vollständige Diagramme wiedergegeben, und zwar veranschaulicht Fig. 56 das Fahrdiagramm für einen Vierwagenzug der Hochbahn Berlin bei einem Zuggewichte von etwa 90 t einschließlich Nutzlast, einer mittleren Stationsentfernung von 800 m und einer mittleren Fahrdrahtspannung von 750 Volt, während Fig. 57 die Fahrlinien für einen elektrischen Zug der Berlin-Wannseebahn bei einem mittleren Zuggewichte von etwa 20 t, einer Stationsentfernung von etwa 2,4 km und einer Fahrdrahtspannung von

Fig. 56.



600 Volt wiedergibt. Sehr anschauliche und vergleichende Diagramme findet man in der E. T. Z. 1904, Heft 23. „Über die Zuführung elektrischer Energie für größere Bahnnetze“ und für Drehstrom mit Berücksichtigung von Kaskadenschaltung (auch für die Bremsung) in E. B. u. B. 1905, Heft 26, 27, 28, „Beförderung schwerer Eisenbahnzüge mit elektrischem Strome“, von Béla Valatin.

Um den Fahrplan graphisch zur Darstellung zu bringen, benutzt man in einfacher Weise das zuerst von Ibry angegebene Verfahren und legt, wie bereits oben erwähnt, bei straßenbahnähnlichem Betriebe v_c und bei Vollbahnbetrieb v_m zugrunde. Trägt

man in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem als Abszissen die Strecke und als Ordinaten die Zeit auf, so ist die Geschwindigkeit gegeben durch die Cotangente des Neigungswinkels α, den eine Gerade vom Koordinatenursprung mit der Abszisse bildet; es ist in Fig. 58 also $ctg\,\alpha = \frac{s}{t}$. Über dem Koordinatensystem zeichnet man das Höhenprofil der Strecke und ist dann in der Lage, die ganze Strecke in bezug auf die Wagenbewegung sofort übersehen zu können.

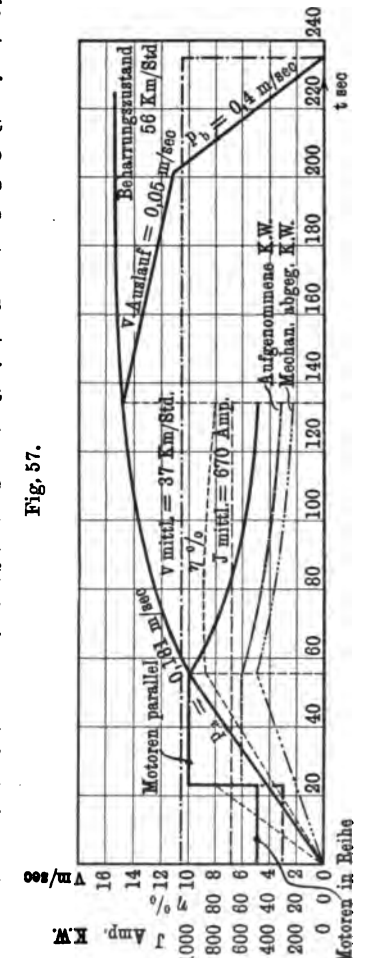


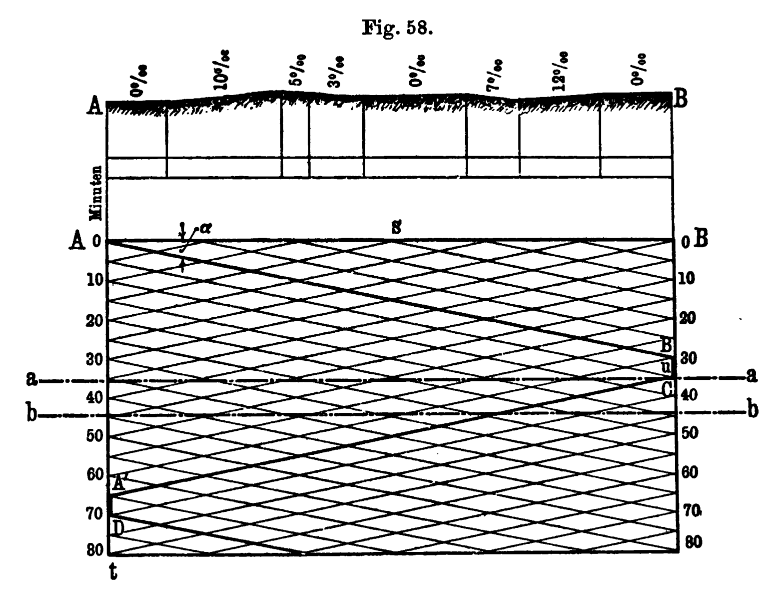
Fig. 57.

Fig. 58 gibt das Bild des Fahrplanes einer Straßenbahn und Tafel VI dasjenige einer Vollbahn. Die Deutung derselben ist ohne weiteres verständlich. In Fig. 58 legt der Wagen von seinem Ausgangspunkte A aus die ganze Strecke mit der kommerziellen Geschwindigkeit v_c zurück, in welcher die Aufenthaltsdauer auf den einzelnen Haltepunkten inbegriffen ist, hat an der Endstation B einen Aufenthalt u Minuten von B bis C, kehrt dann an seinen Ausgangspunkt A' zurück und ist nach der Zeit $A'D$ wieder zur Fahrt bereit. Es ist hierbei zu berücksichtigen, daß der Aufenthalt u an den Endstationen nicht zu gering bemessen wird, um genügende Zeit zum Rangieren der Wagen und zur Revision derselben zu besitzen. In Tafel VI kennzeichnet sich der Aufenthalt auf den einzelnen Stationen durch kurze Ordinatenstücke.

Der Fahrplan läßt nun in einfacher Weise die Bewegung

sämtlicher in den Betrieb eingestellten Wagen bzw. der auf der Strecke befindlichen Züge erkennen und gestattet weiter bei eingleisigen Strecken die Lage und Zahl der Kreuzungspunkte festzulegen. Auch kann mit Hilfe desselben angegeben werden, wann nichtfahrplanmäßige Züge eingeschoben werden können, wie hoch die Fahrgeschwindigkeit gewählt werden darf, wie groß der Aufenthalt auf den einzelnen Stationen mit Rücksicht auf die Kreuzungen zu bemessen ist und vieles mehr. Man ist aber auch weiter in der Lage — und das ist ein Hauptvorzug dieser Darstellung —

Fig. 58.



demselben die für die Berechnung der Kraftstation und der Leitungsanlage erforderlichen Unterlagen zu entnehmen. Sind, wie in Tafel VI angedeutet, die Geschwindigkeits-, Strom- und Zugkraftkurven eingetragen, und ist der Fahrplan aufgestellt, so legt man zur Bestimmung der genannten Daten durch letzteren horizontale Linien *aa*, *bb* und projiziert die Schnittpunkte derselben mit den Bewegungslinien der Fahrzeuge auf die Stromkurven. Man findet dann durch Addition der so erhaltenen Stromwerte die gesamte für einen beliebigen Zeitpunkt durch die im Betriebe befindlichen Wagen oder Züge von der Kraftstation geforderte Stromstärke

und bei gegebener Spannung daraus auch die Höchstleistung der Zentrale. Durch Verschieben der Linien *aa*, *bb* (Fig. 58), wird sich dann ein Zeitpunkt finden lassen, in welchem die erforderliche Energiemenge ein Maximum erreicht, und ist somit diese der weiteren Bestimmung der Leitungen und der Kraftstation zugrunde zu legen. Die Spitzen in der Stromkurve der Tafel VI zeigen das augenblickliche Anwachsen der Stromstärke im Momente des Anfahrens.

Zum Schluß sollen noch einige häufiger zu findende Ausdrucksweisen für die Wagenbewegungen näher erklärt werden. Man bezeichnet die Aufeinanderfolge zweier Wagen (etwa 5, 10, 20 Minuten) mit Verkehrsdichte V_d und die volle Fahrt eines Wagens von A bis D' mit Verkehrsperiode V_i, so daß

$$V_i = 2\left(\frac{60 \,.\, L_{\text{km}}}{u_{\text{km/St.}}} + u\right) \text{Minuten} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 58)$$

$$= m V_d \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 59)$$

Da die Wagenzahl m stets eine ganze Zahl sein muß, so kann man einmal die Verkehrsdichte oder weiter die Wagenzahl aus Gleichung 58) und 59) bzw. den Aufenthalt u auf den Endstationen bestimmen.

Es empfiehlt sich, für die Fahrplandarstellung bequeme Maßstäbe zu wählen, um einen sicheren Überblick über die ganzen Bewegungen zu erhalten.

Sechstes Kapitel.

Die Leitungsanlage.

---

26. Die Berechnung der Arbeitsleitung.

Die Leitungsanlage einer elektrischen Bahn zerfällt in die Arbeitsleitung (Kontaktleitung, Fahrdraht), die Rückleitung und die Speiseleitung mit oder ohne Umformer- bzw. Transformatorenstationen. Bei Gleichstrom- und Einphasen-Wechselstromanlagen erfolgt die Stromzuführung in der Regel durch nur einen Fahr-

draht, während bei Drehstromanlagen stets zwei oberirdische Kontaktleitungen zur Verlegung kommen müssen. Die Rückleitung, bei Drehstrom die dritte Phase, ist an die Fahrschienen angeschlossen und erfolgt durch diese und die Erde. Die Kontaktleitungen werden aus hartgezogenem Kupferdraht oder Profildraht hergestellt und in ihrem geringsten Querschnitt selten unter 40 bis 50 qmm gewählt, entsprechend einem Durchmesser von 7 bis 8 mm, der geboten ist durch die notwendige mechanische Festigkeit und die Betriebssicherheit gegen Drahtbruch usw.

Die Berechnung der Arbeitsleitungen weicht im wesentlichen von derjenigen für stationäre Anlagen ab, weil hier die Stromentnahme sowohl in ihrer Stärke, wie auch bezüglich ihres Ortes eine dauernd wechselnde ist. Bei Bahnen mit festliegendem Fahrplan, also Vorort-, Überland- und Vollbahnen gestaltet sich die Querschnittsbestimmung der Arbeitsleitung günstiger, als bei Straßenbahnen, weil bei letzteren durch die Eigenart des Betriebes die Stromentnahme mit Sicherheit überhaupt nicht festgestellt werden kann. Ein wesentlicher Faktor jedoch erleichtert die Leitungsbestimmung, und das ist der Umstand, daß ein Konstanthalten der Spannung in dem Sinne, wie es für stationäre Anlagen, etwa Beleuchtungsanlagen, der Fall sein muß, bei Bahnanlagen nicht erforderlich ist. Es gilt nur als Bedingung, daß die Motoren bei der niedrigsten zu erwartenden Spannung eine vorgeschriebene Geschwindigkeitsgrenze nicht unterschreiten dürfen, wobei hingegen auch der Fall eintreten wird, daß die Motoren infolge der höheren Spannung in der Nähe der Kraftstation schneller laufen werden, als auf dem letzten Teile der Strecke, was aber für gewöhnlich ohne weiteres unberücksichtigt bleibt.

Für die Wahl des maximalen Spannungsverlustes in der Arbeitsleitung sind im allgemeinen etwa 10 Proz. der Spannung für die Motoren zulässig. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß die Gleichstrom-Nebenschlußmotoren und die Drehstrommotoren in hohem Grade abhängig sind von der Spannung des zugeführten Stromes (vgl. zweites Kapitel) und letztere infolgedessen durch den Spannungsverlust am Endpunkte der Strecke nicht unter einen bestimmten Wert sinken darf. Gleichstrom-Hauptstrommotoren und Einphasenmotoren sind in dieser Hinsicht elastischer. Es folgt

somit, daß der Spannungsverlust bei ausgedehnteren Strecken nur so groß gewählt werden darf, als es die Achsentriebmotoren mit Rücksicht auf ein sicheres Arbeiten gestatten.

Ist das Bahnprofil vollkommen eben oder als ebenes anzusehen, d. h. im letzteren Falle weist dasselbe bei Straßenbahnen keine Steigungen über etwa 12 $^0/_{00}$ und bei Vollbahnen über etwa 7 $^0/_{00}$ auf, so daß in der Gleichung 45) für die Zugkraft

$$K = (w_1 - s)\,G$$

$w_1 - s = 0$, also K im Gefälle Null wird, die für das Befahren der Steigung aufzuwendende Energie durch das stromlose Hinabfahren derselben als ausgeglichen gelten kann, so kann die Arbeitsleitung bei regelmäßigem Verkehr und der einer gewählten Durchschnittsbelastung entsprechenden Stromstärke als vollständig gleichbelastet angesehen werden. In Fig. 58 ist eine derartige Strecke mit Fahrplan dargestellt, aus der man bei Betrachtung der Schnittlinien *aa*, *bb* ohne weiteres erkennen kann, daß der für die Wagen benötigte Strom in angenähert gleichbleibender Stärke und gleichen Abständen dem Fahrdraht entnommen wird.

Die Berechnung gestaltet sich für diesen Fall sehr einfach, wenn man mit Hilfe des im fünften Kapitel Gesagten den Augenblick der maximalen Stromentnahme (*bb*, Fig. 58) ermittelt und diesen der Querschnittsbestimmung zugrunde legt. Es ergibt sich der maximale Spannungsverlust ε_{max} am Ende der Leitung

1. wenn die Kraftstation bei C liegt (Fig. 59a):

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Sigma\, i\,.\,W}{2} = \frac{J_1\,.\,L_1}{2\,.\,q}\,.\,\varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 60\text{a})$$

und

$$q = \frac{J_1\,L_1}{2\,\varepsilon_{max}}\,\varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 60\text{b})$$

2. wenn die Kraftstation bei A oder B (Fig. 59b) liegt:

$$\varepsilon_{max} = \frac{1 + \frac{1}{m_1}}{2}\,.\,\frac{J.L}{q}\,.\,\varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 61)$$

worin $i = i_1 = i_2 \ldots$ die Stromstärke pro Wagen, m_1 die Anzahl der stromverbrauchenden Wagen und L die einfache Länge der Strecke bedeutet.

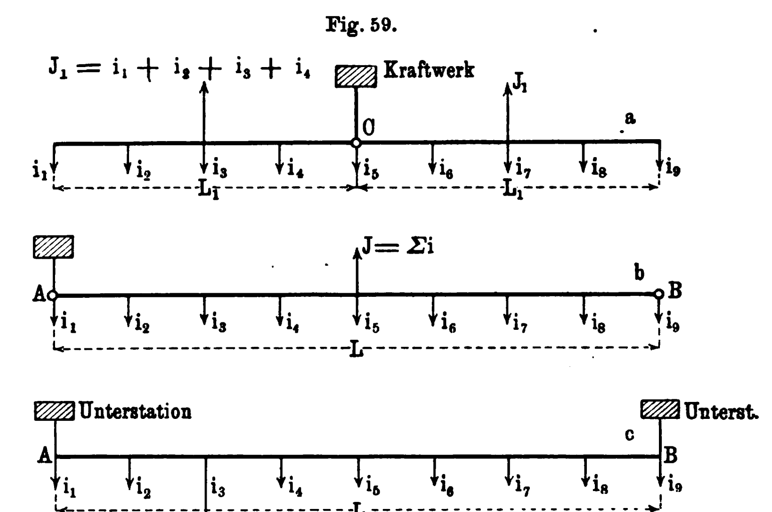
Wird die Leitung von zwei Seiten gespeist, wären also bei *A* und *B* Umformer- oder Transformatorenstationen vorhanden (Fig. 59c), so wäre der maximale Spannungsverlust in der Mitte

$$\varepsilon_{max} = \frac{J.L}{8.q} \cdot \varrho \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 62)$$

$$q = \frac{J.L}{8.\varepsilon_{max}} \cdot \varrho,$$

vorausgesetzt, daß *A* und *B* die Endpunkte der Strecke bilden.

Fig. 59.



Der maximale Spannungsverlust ε_{max} kann, wie bereits erwähnt, für Bahnlagen im allgemeinen größer gewählt werden als für stationäre Anlagen, und zwar etwa bis 10 Proz. der Spannung, die die Motoren an den Klemmen besitzen sollen, abzüglich desjenigen, der für die Rückleitung zugelassen wird.

Ist die Leitung für verzweigte Strecken zu bestimmen, so muß unter den gleichen Gesichtspunkten der gleichmäßigen Belastung zunächst die Stromverteilung ermittelt werden, die sich aus der Anzahl der auf einer Strecke befindlichen Wagen der verschiedenen Fahrtrichtungen ergibt. Verkehren in Fig. 60 auf

der Strecke AB a Wagen und auf der Strecke AD b Wagen, so befinden sich auf der Strecke AC von den nach B laufenden Wagen

$$\frac{AC}{AB} = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$$

$$AC = AB \frac{l_1}{l_1 + l_2} = a \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \text{ Wagen,}$$

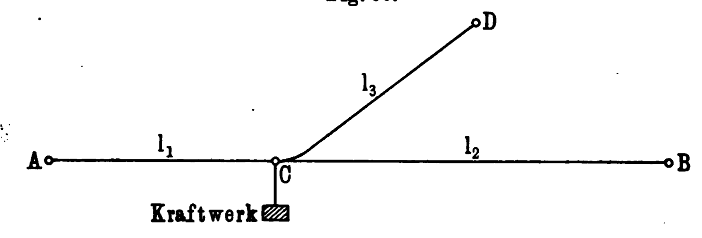
von den nach D laufenden Wagen

$$AC = b \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_3},$$

somit also

$$a \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} + b \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_3} \text{ Wagen,}$$

Fig. 60.



und auf der Strecke CB

$$a \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2} \text{ Wagen,}$$

auf der Strecke CD

$$b \cdot \frac{l_3}{l_1 + l_3} \text{ Wagen.}$$

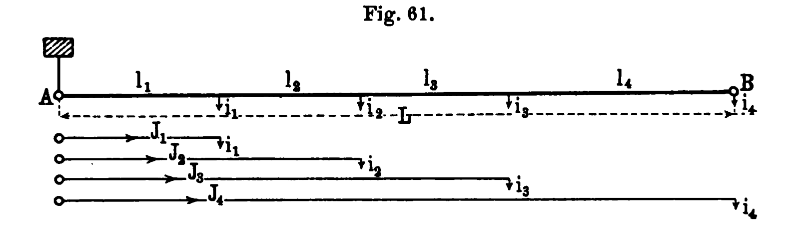
Beträgt der Durchschnittswert des Stromverbrauches jedes Wagens J Amp., so ist der der Querschnittsbestimmung zugrunde zu legende Stromverbrauch durch die Gleichung 63) bestimmt. Es ist somit

$$\left.\begin{aligned} J_{AC} &= aJ \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} + b \cdot J \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_3} \\ J_{CB} &= aJ \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2} \\ J_{CD} &= bJ \cdot \frac{l_3}{l_1 + l_3} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 63)$$

und der Querschnitt aus Gleichung 61) zu ermitteln.

Weist das Streckenprofil dagegen Höhendifferenzen auf, die nicht mehr vernachlässigt werden können, so wird die augenblickliche Stromentnahme eine sehr verschiedene sein, und die durch diese bewirkten Spannungsverluste $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \ldots$ wesentlich voneinander abweichen. Jeder Strom i ruft einen Spannungsverlust in der Leitung hervor, der sich aus der bekannten Gleichung $\varepsilon = \frac{il}{q}\varrho$ finden läßt, und man wird demzufolge den maximalen Spannungsverlust für einen beliebigen Punkt einer einseitig gespeisten Strecke erhalten, wenn man die einzelnen Spannungsverluste übereinanderlagert, die von den in dem betrachteten Leitungsstücke fließenden Strömen hervorgerufen werden. Es ist dieses in Fig. 61 dargestellt und ohne weitere

Fig. 61.



Erklärung verständlich. Der maximale Spannungsverlust am Ende der Strecke ergibt sich dann zu

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Sigma J . l}{q} \cdot \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 64)$$

worin

$$\begin{aligned} \Sigma J &= J_1 + J_2 + J_3 + \cdots + J_n, \\ J_1 &= i_1 + i_2 + i_3 + \cdots + i_n, \\ J_2 &= \phantom{i_1 +{}} i_2 + i_3 + \cdots + i_n, \\ J_n &= \phantom{i_1 + i_2 + i_3 + \cdots +{}} i_n \end{aligned}$$

bedeutet. Die Stromstärken und Längen l sind mit Hilfe des Fahrplanes und Streckenprofiles festzustellen.

Wird die Strecke von zwei Seiten gespeist, so ist die Stromverteilung auf ähnliche Weise zu finden. In Fig. 62 ist ein Teil einer von mehreren Speiseleitungen aus mit Strom versorgten Kontaktleitung dargestellt. Man nimmt nun zunächst für die

Ermittelung der Stromverteilung an, daß der Arbeitsleitung bei a allein der Strom zugeführt wird. Von b aus lagert sich diesem Strome ein zweiter in entgegengesetzter Richtung über, der den Spannungsverlust am Ende der Strecke zum Verschwinden bringen würde, wenn er tatsächlich abgezweigt würde, so daß

$$\Sigma i \, . \, W_l + J_x \, . \, W_L = 0$$

wird. Infolgedessen ist der von b zufließende Strom

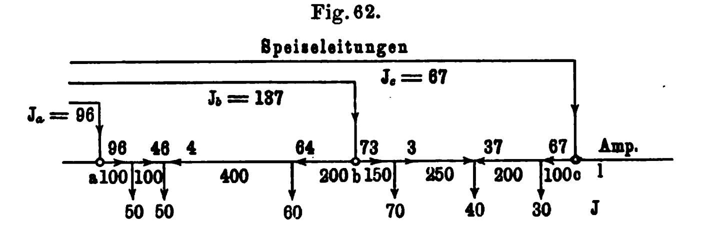
$$\frac{\Sigma i \, . \, W_l}{W_L} = - J_x$$

oder

$$\frac{\Sigma i \, . \, l}{L} = - J_x, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 65)$$

wobei das — Zeichen soviel bedeuten soll, als daß der Strom von b aus in der Richtung nach a den Motoren zufließt. Auf diese

Fig. 62.



Weise bestimmt man die auf die Speisepunkte a, b, c . . . entfallenden Stromstärken, addiert dieselben für jeden Punkt und findet so die von diesen im Augenblicke der stärksten Stromentnahme jedem Streckenabschnitt zuzuführenden Strommengen. Man zeichnet die errechnete Stromverteilung ein und bestimmt bei Wahl von ε_{max} den Querschnitt der Arbeitsleitung. Zur näheren Erklärung sei ein Beispiel angegeben. In Fig. 62 werden der Kontaktleitung durch die Speisepunkte a, b, c . . . vom Kraftwerke Strom zugeführt. Die der augenblicklichen Stellung der Wagen entsprechenden Stromstärken i_1, i_2 . . . betragen 50, 50, 60 . . . Amp. Aus Gleichung 65) folgt demnach der vom Speisepunkt b dem Streckenabschnitt ab zuzuführende Strom

$$- J_b = \frac{160 \, . \, 100 + 110 \, . \, 100 + 60 \, . \, 400}{800} \cong 64 \text{ Amp.}$$

und somit ist der Speisepunkt a mit 96 Amp. belastet. Für die Strecke bc ergibt sich

$$-J_c = \frac{140.150 + 70.250 + 30.200}{700} \cong 67 \text{ Amp.}$$

und

$$J_b = 73 \text{ Amp.}$$

Die Stromverteilung entspricht der in Fig. 62 angegebenen. Die Speisepunktsbelastungen sind:

$$J_a = 96 \text{ Amp.}; \quad J_b = 137 \text{ Amp.}; \quad J_c = 67 \text{ Amp.}$$

usw.

Beträgt die Betriebsspannung am Fahrdraht 500 Volt und wählt man als maximalen Spannungsverlust 10 Proz. = 50 Volt, von denen etwa 15 Volt für Rückleitung verwendet werden sollen, so ergeben sich folgende Querschnitte:

für die Strecke $ab: q = \frac{\Sigma i . l}{\varepsilon_{max}} \cdot \varrho$

$$= \frac{96.100 + 46.100}{35} . 0{,}0175 = 7{,}1 \text{ qmm,}$$

für die Strecke $bc: q = \frac{73.150 + 3.250}{35} . 0{,}0175 = 5{,}81$ „

Diese Querschnitte können naturgemäß nicht zur Verlegung kommen, und man wird mit Rücksicht auf genügende mechanische Festigkeit einen durchgehenden Querschnitt von etwa 40 qmm wählen, wodurch sich der Spannungsverlust auf 6,2 Volt reduzieren würde, ein Maß, das natürlich belanglos ist.

Wird der aus der Rechnung bei der Wahl von ε sich ergebende Querschnitt zu stark, so nimmt man entweder zwei nebeneinander geführte, parallel geschaltete Kontaktleitungen oder verlegt seitlich an den Masten der Fahrleitung eine Zusatzleitung, die streckenweise mit der Arbeitsleitung verbunden wird. Die Berechnung letzterer erfolgt analog derjenigen für die Arbeitsleitung selbst (Fig. 63).

Das bisher Gesagte gilt in gleichem Maße auch für die Berechnung der dritten Schiene als Kontaktleitung. Bezeichnet W_s den Widerstand der Schiene, G_s das Gewicht derselben pro

laufendes Meter in Kilogramm und Q_s den Querschnitt in Quadratmillimetern, so ist

$$G_s = \frac{Q_s}{1000} \cdot \gamma_s \quad \text{und} \quad Q_s = \frac{1000 \,.\, G_s}{\gamma_s} \quad . \; . \; . \quad 66)$$

oder der Widerstand pro 1 km Schienenlänge ohne Berücksichtigung desjenigen, der bei den Schienenstößen auftritt

$$W_s = \frac{1000}{Q_s} \cdot \varrho_s = \frac{\gamma_s \cdot \varrho_s}{G_s} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 67a)$$

worin γ_s das spezifische Gewicht der Schiene $\cong 7{,}85$
und ϱ_s den spezifischen Widerstand derselben $\cong 0{,}13$

bedeutet. Demnach ergibt sich unter Einführung dieser Werte in Gleichung 67a)

$$W_s \cong \frac{1}{G_s}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 67b)$$

also ist der Widerstand umgekehrt proportional dem Gewichte der Schiene. Der Querschnitt ist dann leicht zu ermitteln.

Fig. 63.

Verstärkungsleitung

KL

Werden die Leitungen dagegen von Wechselstrom durchflossen, so gestaltet sich die Berechnung derselben, namentlich wenn die Schienen als Stromleiter mit benutzt werden, nicht gleich günstig und sicher, wie bei Gleichstrom, weil dann zu dem Ohmschen noch der induktive Spannungsverlust hinzutritt. Eine Behandlung dieses reichlichen Stoffes kann hier des Umfanges des Büchleins wegen nicht gegeben werden und sei deshalb auf einen Aufsatz von Leo Lichtenstein [1]) verwiesen, der neben theoretischen Erklärungen auch eine Anzahl der Praxis entnommene Beispiele bringt.

Die Schienenrückleitung. Um die mit bedeutenden Kosten verbundene Stromrückleitung durch eine gleichfalls aus

[1]) Vgl. Leo Lichtenstein, E. T. Z. 1907, Heft 6: Zur Theorie der Wechselstromverzweigung; E. T. Z. 1907, Heft 25 u. 26: Experimentelle Bestimmung der für die Berechnung von Wechselstrombahn-Leiteranlagen maßgebenden physikalischen Größen.

Kupfer hergestellte zweite Arbeitsleitung zu vermeiden, benutzt man heute ausschließlich die Laufschienen infolge ihres großen Querschnittes und demnach relativ geringen Widerstandes als Rückleitung bzw. Leitung für die dritte Phase bei Drehstrombahnen. Es erübrigt sich, hier auf die Schienenrückleitung und die hierbei auftretenden elektrischen Vorgänge näher einzugehen[1]). Zur Vervollständigung soll daher nur kurz das Wesentlichste hervorgehoben und eine Berechnung erläutert werden.

Als Hauptbedingungen für eine gute und sichere Stromrückleitung durch die Laufschienen gelten kleine Spannungen gegen Erde und geringe Übergangswiderstände an den Schienenstößen. Letztere werden hervorgerufen durch die Unterbrechung der Schienenstrombahn an den Stößen und durch die Laschenverbindungen der Schienen unter sich, weil hier der Kontakt zwischen Schiene und Lasche, durch welch letztere der Strom auf die anstoßende Schiene übertragen werden muß, meist ein völlig ungenügender ist. Es ist so dem Strome die Möglichkeit gegeben, in das umgrenzende Erdreich auszutreten und hier bei Gleichstrom durch seine elektrolytische Wirkung auf nahe Gas- und Wasserrohrleitungen, sowie bei Wechsel- und Drehstrom durch seine Induktionswirkungen auf Telephon- und Telegraphenleitungen unliebsame Erscheinungen hervorzurufen.

Um dem Strome einen widerstandsfreieren Weg über den Schienenstoß zu bieten, verwendet man starke Kupferleitungen zur Überbrückung der Stöße, die in die Schienen eingenietet oder gleichwertig befestigt werden. Es sind hierfür eine beträchtliche Zahl von Konstruktionen in der Praxis vertreten, auf die jedoch nicht näher eingegangen werden soll, und die in ihren häufigsten Ausführungen wohl auch als bekannt vorausgesetzt werden können. Als Material wird in den meisten Fällen blanker Kupferdraht verwendet.

Der gesamte Widerstand der Schienenrückleitung setzt sich nun zusammen aus dem Widerstande des Gleises W_{g_s}, dem Widerstande der Schienenstoßverbindungen W_v und dem Widerstande an den Übergangsstellen W_u von Schiene zu Schiene, so daß also

$$W_r = W_{g_s} + W_v + W_u = \frac{1}{2\,G_s} + \frac{l_v \cdot \varrho_v}{q_v} + W_u \quad . \qquad 68)$$

[1]) Vgl. Dr. Michalke: Die vagabundierenden Ströme elektrischer Bahnen, IV. Bd. der Einzeldarstellungen.

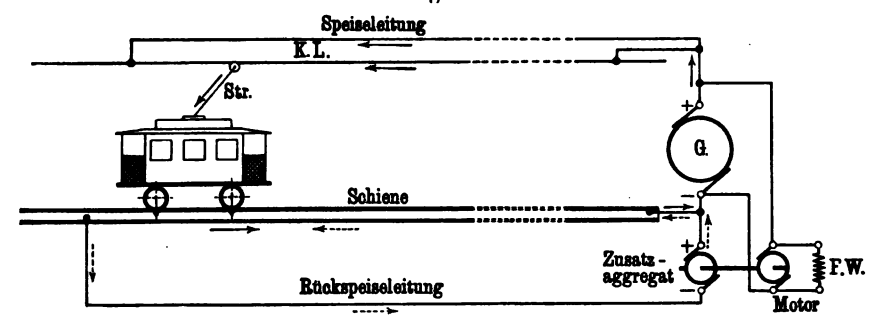
Für den Übergangswiderstand W_u kann man etwa 0,002 bis 0,001 Ohm pro Stoß rechnen, einen Wert, der durch zahlreiche Versuche ermittelt worden ist. Der durch W_r bedingte Spannungsabfall ist nun nicht beliebig wählbar, sondern begrenzt, und zwar bei Gleichstromanlagen durch die elektrolytischen Wirkungen auf umliegende Metallteile, die schon bei ganz geringen Spannungen auftreten und bei Drehstromanlagen durch den Umstand, daß alle drei Phasen möglichst gleichen Widerstand besitzen müssen, um nicht ungleiche Phasenspannungen zu erhalten. Im allgemeinen darf der Spannungsverlust bei Gleichstrombahnen in Städten etwa 5 bis 7 Volt und dort, wo in unmittelbarer Nähe Gas- und Wasserrohrleitungen liegen, 2 bis 3 Volt nicht übersteigen, während bei Überland- und Vollbahnen etwa 1 Volt pro 1 km zugelassen werden kann.

Ist der Querschnitt des Gleises mit Rücksicht auf den Spannungsverlust nicht genügend, so schaltet man entweder eine blanke Kupferleitung parallel zu den Schienen und verbindet sie in Abständen von 300 bis 500 m mit denselben, oder man verwendet Schienenspeisekabel, die mit den Sammelschienen der Zentrale in Verbindung stehen. Hierbei kann nun aber der Fall eintreten, daß das kürzeste Kabel in der Nähe des Kraftwerkes nicht mit Rücksicht auf Spannungsverlust, sondern der hohen Stromstärken wegen, die dasselbe zu führen hat, nach der Stromdichte = Amp./qmm bemessen werden muß und der Spannungsverlust dann nur sehr gering wird. Infolgedessen werden die übrigen Schienenspeisekabel unverhältnismäßig kostspielig, da dieselben für den gleichen Spannungsverlust dimensioniert werden müssen. Man kann sich in dieser Beziehung dadurch helfen, daß man den Widerstand des kürzesten Kabels künstlich erhöht, und erhält dann, wenn die anderen Kabel auf Spannungsverlust berechnet werden, wesentlich kleinere Querschnitte.

Bei langen Leitungen, also ausgedehnten Bahnanlagen, wählt man zur Verminderung des Spannungsverlustes in den Schienen zweckmäßig eine zuerst von Kapp vorgeschlagene Methode, die darin besteht, daß man in die Rückleitung einen hohen Spannungsverlust legt und diesen dann durch eine zwischen die negative Sammelschiene des Kraftwerkes und die Leitung geschaltete Stromquelle wieder kompensiert. Bei Gleichstrombahnen benutzt man hierzu besondere Zusatzmaschinen oder Akkumu-

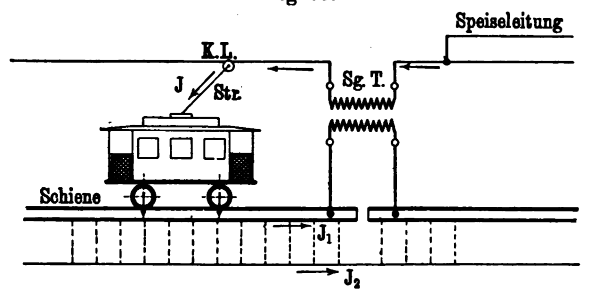
latorenbatterien und bei Wechselstrombahnen sogenannte Saugtransformatoren. Die Zusatzmaschinen bzw. Batterien sind in ihrer Größe bestimmt durch die maximale Stromstärke und den Spannungsverlust der Rückleitung, den sie kompensieren sollen; ihre Schaltung zeigt Fig. 64. Die Saugtransformatoren sind kleine

Fig. 64.



Transformatoren, die in gewissen Zwischenräumen längs der Bahnstrecke aufgestellt werden und deren Primärwickelungen mit dem Fahrdraht, deren Sekundärwickelungen mit der Schienenleitung in Reihe geschaltet werden (Fig. 65). Der den Wagen durch den Stromabnehmer zugeführte Strom J wird teils durch die Schienen

Fig. 65.

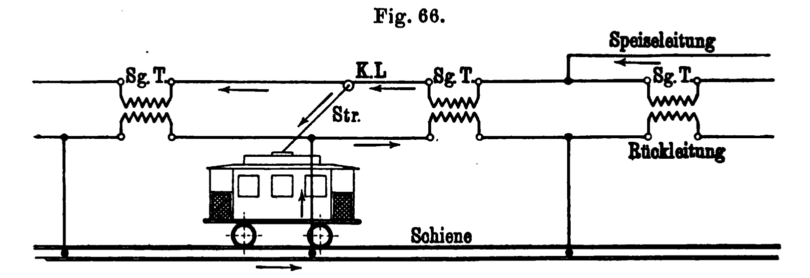


J_1 und teils durch das angrenzende Erdreich J_2 seinen Weg zur Kraftstation zurücknehmen. Der Transformator *Sg. T.* dient nun dazu, die zwischen Schiene und Erde auftretende Potentialdifferenz auszugleichen, den Strom also lediglich in den Schienen verlaufen zu lassen. Man ist durch diese Anordnung in der Lage, einmal

den in das Erdreich austretenden Strom fast völlig zum Verschwinden zu bringen, ferner aber auch den beträchtlichen Spannungsabfall in der Rückleitung zu verkleinern. Eine genaue theoretische Erklärung findet sich in E. Arnold, Die Wechselstromtechnik, Band II und in der E. T. Z. 1904.

Die Maschinenfabrik Oerlikon benutzt diese Saugwirkung eines Reihentransformators dazu, die Schienen möglichst stromlos zu machen und also den Spannungsverlust, der durch dieselben hervorgerufen wird, zu verringern. Zu diesem Zwecke ist parallel zu den Schienen eine zweite Rückleitung verlegt, die aus einem gewöhnlich auf Isolatoren angeordneten blanken Kupferleiter besteht. Zwischen letzterem und der Kontaktleitung werden dann

Fig. 66.



in zweckmäßigen Abständen Saugtransformatoren eingeschaltet (Fig. 66), deren Primärwickelungen mit der Oberleitung und deren Sekundärwickelungen mit der besonderen Rückleitung in Reihe geschaltet sind. An beiden Seiten jedes Saugtransformators sind die Schienen mit der Rückleitung direkt verbunden.

27. Die Speiseleitungen.

Um den Kontaktleitungen den Arbeitsstrom von einem gemeinsamen Kraftwerke aus zuzuführen, sind diese durch sogenannte Speiseleitungen mit den Sammelschienen desselben verbunden, und zwar entweder direkt oder unter Zwischenschaltung von Umformer- bzw. Transformatorenstationen. Ist die Bahnstrecke nur kurz, etwa bis 1,5 km, so kann von einer gesonderten Speiseleitung abgesehen und die Kontaktleitung unter Berücksichtigung der für einen sicheren und geordneten Betrieb erforderlichen Schalt- und Meßinstrumente unmittelbar an die Sammel-

schienen angeschlossen werden (Fig. 67 a). Welche maximale Länge bei nicht zu starkem Querschnitt der Arbeitsleitung (etwa 40 bis 50 qmm) die Strecke in diesem Falle besitzen darf, kann in einfachster Weise mit Hilfe der Gleichung 64) ermittelt werden

$$\frac{\Sigma . J . l}{q} \cdot \varrho = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_r),$$

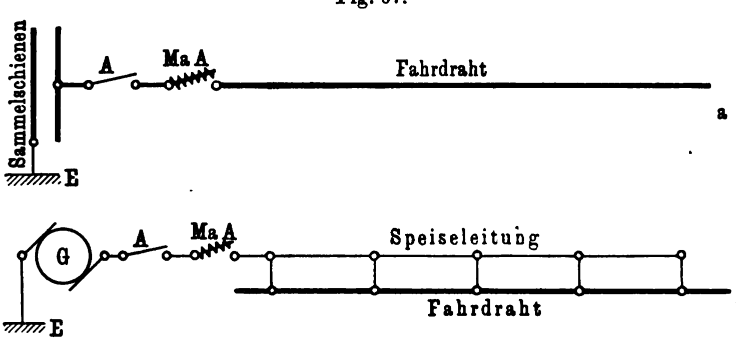
worin $\varepsilon_{max} - \varepsilon_r$ den für die Kontaktleitung zur Verfügung stehenden Spannungsverlust, also den maximalen Spannungsverlust abzüglich des für die Rückleitung zugelassenen ε_r bedeutet.

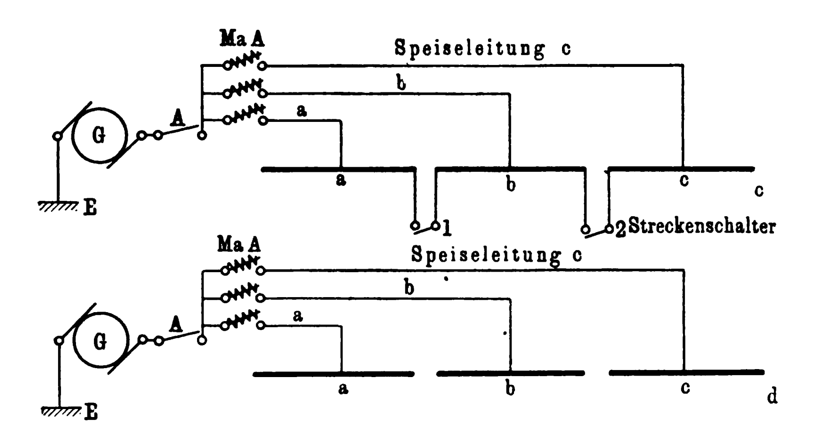
Übersteigt bei Bahnanlagen geringerer Ausdehnung (Industriebahnen, Uferbahnen, Straßenbahnen usw.) der Spannungsverlust am Ende der Strecke die zulässige Höhe, so ordnet man mit Rücksicht auf den Querschnitt der Arbeitsleitung entweder eine Zusatzleitung längs des Fahrdrahtes (Fig. 67 b), oder eine einfache Speiseleitung etwa für die Mitte der Strecke an. Bei ausgedehnteren Bahnnetzen wird es jedoch zur Notwendigkeit, bestimmte Streckenabschnitte ähnlich großen Lichtverteilungsanlagen durch gesonderte Speiseleitungen mit dem Kraftwerke zu verbinden, die ihrerseits wiederum Verstärkungsleitungen erhalten können (Fig. 67 c). Es läßt sich so nach einigermaßen geschicktem Überblick über die gesamte Anlage das Zweckmäßigste und Wirtschaftlichste leicht bestimmen. Die Zahl und Lage der Speisepunkte wird den auftretenden stärksten Belastungen entsprechend angenommen, die durch die Gelände- und Verkehrsverhältnisse gegeben sind. Man gewinnt durch eine derartige Anordnung des gesamten Leitungssystemes in erster Linie den Vorteil der Materialersparnis an Kupfer für Kontakt- und Speiseleitungen, weil die Leitungen nicht den vollen Strom zu führen haben, sondern die Stromlieferung stets von zwei Seiten erfolgt. Unterteilt man ferner noch die Arbeitsleitung in mehrere entweder durch Handausschalter oder automatische Schalter miteinander in Verbindung stehende Abschnitte, so wird die ganze Anlage überaus elastisch. Es gestattet eine derartige Ausführung dann nicht nur eine leichte Fehlerbestimmung in einem der Streckenabschnitte, sondern auch eine ungestörte Aufrechterhaltung des Betriebes, selbst wenn ein Teil der Strecke durch Drahtbruch usw. außer Betrieb gesetzt werden muß. Man kann so die Ursache der Betriebsstörung lokalisieren und den Verkehr der Züge durch Umsteigen dennoch fort-

gehen lassen. Fig. 67 c und d gibt zwei häufig zur Ausführung kommende Unterteilungen der Arbeitsleitung an.

Ergibt sich aus dem maximal zulässigen Spannungsverlust für einzelne Speiseleitungen ein zu starker Kupferquerschnitt, so kann in letzteren die Spannung erhöht werden und zwar durch

Fig. 67.





einen Zusatzgenerator (Fig. 68). Derselbe ist für die maximale Stromstärke und die zu erzeugende Spannungserhöhung zu bemessen.

Die Querschnittsbestimmung der Speiseleitungen erfolgt nun auf Grund der durch den Fahrplan ermittelten maximalen Stromentnahme bzw. bei verzweigten und ungleichmäßig belasteten

Arbeitsleitungen nach Berechnung der Stromverteilung auf die einzelnen Speisepunkte.

Bezeichnet $\mathfrak{E}_2$ den Effekt am Speisepunkte,
e den Effektverlust vom Kraftwerk bis zum Speisepunkte,
E_2 die Spannung am Speisepunkte, bei Drehstrom die verkettete Spannung,
l die einfache Länge der Speiseleitung,
W_l den Widerstand der Kupferleitung,
$\cos\varphi$ den Leistungsfaktor der Motoren,

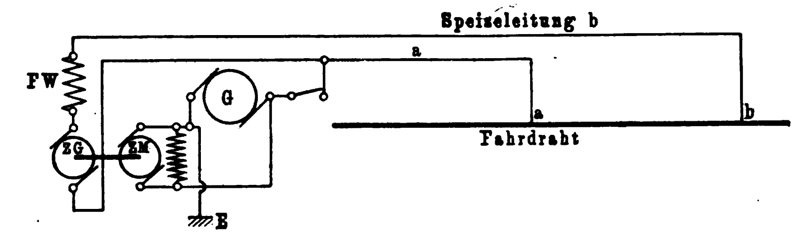
so ist

a) für Gleichstrombahnen

$$\mathfrak{E}_2 = J \, . \, E_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 69)$$

$$e = J^2 \, . \, W_l = \frac{J^2 \, . \, 2\,l}{q} \cdot \varrho \quad \ldots \ldots \quad 70\,a)$$

Fig. 68.



und mit Gleichung 69) der Effektverlust

$$e = \frac{\mathfrak{E}_2^2 \, . \, 2\,l}{E_2^2 \cdot q} \cdot \varrho \quad \ldots \ldots \ldots \quad 70\,b)$$

oder wenn e in Prozenten der Leistung an der Verbrauchsstelle ausgedrückt wird, also

$$e = \frac{p}{100} \mathfrak{E}_2,$$

so wird der Querschnitt der Speiseleitung

$$q = 1{,}75 \, \frac{\mathfrak{E}_2 \, . \, 2\,l}{E_2^2 \cdot p}; \quad \ldots \ldots \ldots \quad 71)$$

b) für Einphasenwechselstrombahnen

$$\mathfrak{E}_2 = J \cdot E_2 \cdot \cos\varphi \quad \ldots\ldots\ldots \quad 72)$$

$$e = J^2 \cdot W_l = \frac{J^2 \cdot 2\,l}{q} \cdot \varrho \quad \ldots\ldots \quad 73\,\mathrm{a})$$

$$= \frac{\mathfrak{E}_2^2 \cdot 2\,l}{E_2^2 \cdot \cos^2\varphi \cdot q} \cdot \varrho \quad \ldots\ldots \quad 73\,\mathrm{b})$$

und

$$q = 1{,}75\,\frac{\mathfrak{E}_2 \cdot 2\,l}{E_2^2\,\cos^2\varphi \cdot p};$$

c) für Drehstrombahnen

$$\mathfrak{E}_2 = \sqrt{3} \cdot J E_2 \cdot \cos\varphi \quad \ldots\ldots \quad 74)$$

$$e = 3\,J^2 \cdot W_l = \frac{3\,J^2 \cdot l}{q} \cdot \varrho \quad \ldots\ldots \quad 75\,\mathrm{a})$$

$$= \frac{\mathfrak{E}_2^2 \cdot l}{E_2^2 \cdot \cos^2\varphi \cdot q} \cdot \varrho \quad \ldots\ldots \quad 75\,\mathrm{b})$$

und

$$q = 1{,}75\,\frac{\mathfrak{E}_2 \cdot l}{E_2^2 \cdot \cos^2\varphi \cdot p} \quad \ldots\ldots \quad 76)$$

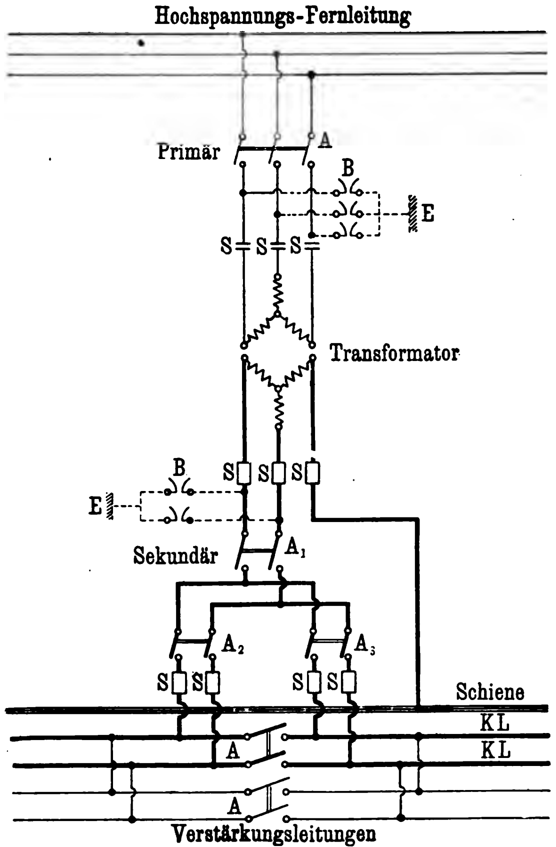
Gebieten es die örtlichen Verhältnisse, daß das Kraftwerk nicht in unmittelbarer Nähe der zu speisenden Strecke angelegt werden kann, oder handelt es sich um eine weit ausgedehnte und verzweigte Bahnanlage, so wird es wirtschaftlich das zweckmäßigste sein, als Stromart Wechsel- oder Drehstrom zu wählen, die Stromerzeugungsstation unabhängig von den Strecken an einem für dieselbe hinsichtlich Verkehrsgelegenheiten, Kohlen- und Wasserbeschaffung usw. günstigen Orte zu errichten und von hier aus die Energie in Form von hochgespanntem Strom dem Fahrdraht direkt oder einzelnen längs der Strecke aufgestellten Transformatorenstationen zuzuführen. Mittels letzterer wird dann Strom und Spannung transformiert und so Niederspannung für die Speisung der Fahrleitung verwendet. Es wird zwar bei einer derartigen elektrischen Ausgestaltung der Strecke der Wirkungsgrad der Gesamtanlage beeinträchtigt, doch ist dieser Umstand für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes bei dem hohen Güteverhältnis gut gebauter Transformatoren nicht wesentlich von Bedeutung.

Für die Feststellung der günstigsten Zahl der Transformatorenstationen längs einer Bahnlinie sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen. In erster Linie ist eine zu reichliche Anzahl von Transformatoren zu vermeiden, um das Verhältnis der augenblicklich an der Stromlieferung teilnehmenden Transformatoren zu den installierten möglichst groß zu gestalten. Der Anschluß der einzelnen Transformatoren entspricht im allgemeinen den Anschlußpunkten von Speiseleitungen, und es ist demnach die Stromverteilung analog dem vorher Gesagten bestimmbar. Hieraus geht hervor, daß in der Hauptsache nur diejenigen Transformatoren an der Stromlieferung teilnehmen, zwischen denen sich jedesmal Züge befinden und bei starkem Verkehr in ganz geringem Maße auch noch die zunächst benachbarten. Je größer daher die Zahl der Transformatorenstationen gewählt wird, um so kürzere Zeit werden dieselben beansprucht werden. Dieses tritt namentlich bei geringerer Zugfolge, wie sie bei Vollbahnbetrieb stets durch die langen und schweren Zugeinheiten bedingt sein wird, zutage, denn die Leistung der Streckentransformatoren richtet sich nach den augenblicklich verlangten Energiemengen und kann durch eine vermehrte Anzahl nicht vermindert werden. Ferner sind die Entfernungen zwischen den einzelnen Aufstellungsorten so zu bemessen, daß der maximal zulässige Spannungsverlust in der Kontaktleitung nicht überschritten wird, wobei noch darauf hingewiesen werden soll, daß auch auf die wattlosen Ströme und den durch dieselben bedingten induktiven Spannungsverlust Rücksicht zu nehmen ist. Endlich wird es zweckmäßig sein, die Transformatorenstationen nach Möglickeit in die Nähe der Haltestellen zu legen, um jederzeit eine leichte und bequeme Revision vornehmen zu können. Als mittlere gegenseitige Entfernung kann etwa 3 bis 3,5 km angenommen werden.

Die Leistungen, für die die einzelnen Transformatoren zu wählen sind, ergeben sich aus den Steigungsverhältnissen der zunächstliegenden Streckenabschnitte, sowie aus der Zahl der gleichzeitig zwischen zwei Stationen befindlichen Züge. Sind die Größenunterschiede nicht wesentliche, so empfiehlt es sich, lauter gleiche Transformatortypen aufzustellen, um möglichste Einfachheit in der Beschaffung von Reservematerialien usw. zu erhalten. Liegt das Kraftwerk an einem Endpunkte der Strecke, so wird es

zweckmäßig sein, für die Hochspannungsleitung einen durchgehend gleichen Querschnitt zu verlegen und die einzelnen Transformatoren parallel zu dieser zu schalten. Die Berechnung dieser Leitung kann mit Hilfe der Gleichung 64) erfolgen.

Fig. 69.



In Fig. 69 ist das Schaltungsschema einer Transformatorenstation für Drehstrom dargestellt. Dieselbe kann zwecks Revision und Vornahme von Reparaturen durch den dreipoligen Schalter *A* von der Hochspannungsleitung abgéschaltet werden. Die Hoch- und Niederspannungsseite erhält je drei Sicherungen oder zu-

verlässiger und zweckmäßiger noch automatische Maximalausschalter mit Zeiteinstellung (vgl. siebentes Kapitel), und zwar ist auch die mit der Schiene verbundene Leitung in gleicher Weise auszustatten, um den Transformator vollständig vom Netz abschalten und so gefahrlose Untersuchungen vornehmen zu können. Die Kontaktleitungen, die noch Verstärkungsleitungen erhalten können, sind mit Trennschaltern versehen, die bei Betriebsstörungen auf einem Teile der Strecke ein sofortiges Abtrennnen derselben von der Transformatorenstation ermöglichen, ohne daß die Stromlieferung für den anderen Teil der Strecke durch die Schalter A_1, A_2 und A_3 unterbrochen werden muß. Während des normalen Betriebes sind natürlich sämtliche Schalter geschlossen.

Siebentes Kapitel.

Das Kraftwerk.

28. Die Lage des Kraftwerkes.

Hat man sich nach Ermittelung des Kraftbedarfes der einzelnen Strecken und auf Grund der am Schluß des ersten Kapitels gekennzeichneten besonderen Gesichtspunkte über die zu wählende Stromart schlüssig gemacht, so wird es sich für das Kraftwerk in erster Linie darum handeln, festzustellen, an welchem Orte dasselbe zu errichten ist. Die Platzfrage erfordert, wie für eine jede derartige Anlage, die zur gleichzeitigen Speisung mehrerer getrennt gelegener Stromverbrauchsstellen dient, ganz besonders für Bahnanlagen eine sorgfältige und eingehende Prüfung aller in Betracht zu ziehenden Faktoren. Die Rentabilität einer Anlage ist eng verbunden mit einer günstigen Lage der Stromerzeugungsstation. Die verschiedenartigen Stromarten und Spannungen machen jedoch zunächst eine Trennung der Frage notwendig.

Handelt es sich um Gleichstromanlagen mit Spannungen bis etwa 1000 Volt, d. h. ist sowohl für das Kraftwerk, als auch

für die Achsentriebmotoren Gleichstrom vorgesehen, so ist aus leicht erklärlichen Gründen das Kraftwerk möglichst in die Mitte des Hauptkonsumgebietes, also zwischen die stärksten Stromverbrauchsstellen zu legen. Der Querschnitt der Speiseleitungen, somit die aufzuwendende Kupfermenge und der Energieverlust wird sich dann auf ein Minimum reduzieren lassen. Wie aus Gleichung 70 b)

$$e = \frac{\mathfrak{E}_2^2 \cdot 2 \cdot l}{E_2^2 \cdot q} \cdot \varrho$$

hervorgeht, ist letzterer proportional dem Quadrate des Effektes, der am Speisepunkte zur Verfügung stehen soll, und nimmt im umgekehrten Verhältnis mit dem Quadrate der Spannung ab. Es wird demnach, soll der maximale Energieverlust von 10 Proz. nicht überschritten werden, das Stromversorgungsgebiet, das mit Gleichstrom üblicher Spannungen (550, 750, 1000 Volt) versehen werden kann, ein begrenztes sein.

Die Leitungen für Bahnbetriebe können im allgemeinen höher als normal zulässig beansprucht werden, und zwar hat der Verband deutscher Elektrotechniker, dessen Vorschriften für die Ausführung elektrischer Anlagen in Deutschland behördlicherseits maßgebend sind, in den Sicherheitsvorschriften für elektrische Straßenbahnen und straßenbahnähnliche Kleinbahnen (gültig vom 1. Oktober 1906) in § 11 unter anderem für blanke Kupferleitungen Folgendes festgesetzt:

„Blanke Kupferleitungen bis zu 50 mm² unterliegen den Vorschriften der Tabelle über isolierte Leitungen; blanke Kupferleitungen über 50 mm² und unter 1000 mm² Querschnitt können mit 2 Ampere für das Quadratmillimeter belastet werden.

Bei Freileitungen, Fahrstromleitungen und anderen intermittierenden Betrieben ist eine Erhöhung der Belastung über die Tabellenwerte zulässig, sofern dadurch keine Beeinträchtigung der Festigkeit oder gefährliche Erwärmung entsteht."

Wenn sich auch nach diesen Gesichtspunkten in einigen Fällen die Platzfrage für das Kraftwerk wird beurteilen lassen, so werden dieselben bei der Wahl von hochgespanntem Strome weniger in den Vordergrund treten. Es sind dann wesentlich andere Bedingungen zu erfüllen, die sich auf die Lage des Kraftwerkes an sich beziehen. Ist letzteres nicht von vornherein an einen bestimmten Ort gebunden, was beispielsweise bei Ausnutzung

von Wasserkräften, Anlehnung an Kohlenbergwerke usw. der Fall ist, so sind folgende Faktoren in erster Linie zu berücksichtigen, die für die Selbstkosten der Stromerzeugung und somit für die Rentabilität der Gesamtanlage von ausschlaggebender Bedeutung sind. Es sind dieses:

die Erwerbskosten für das Terrain bzw. der Pachtpreis für dasselbe;
günstige Wasserverhältnisse zur Speisung der Kessel und für den Betrieb von Kondensationsanlagen;
billigste und leichte Transportverhältnisse für die Betriebsmaterialien (Kohle, Öl usw.);
gute und bequeme Anfuhrstraßen (Bahnanschluß, Wasserstraßen).

Stehen mehrere Plätze für die Anlage des Kraftwerkes zur Verfügung, so wird man nur auf Grund sorgfältigster Rechnungen und Kalkulationen in der Lage sein, den für eine Bahnanlage günstigsten Ort zu bestimmen. Man kann in solchem Falle etwa folgendermaßen verfahren:

Man bestimmt zunächst überschläglich die Anlagekosten des Kraftwerkes, die jährlich zu erwartenden Betriebseinnahmen und -ausgaben und hieraus die Kosten pro effektiv geleistete KW-Stunde. Weiter ergeben sich dann die Kosten für den jährlichen Effektverlust $e \cdot T = \frac{J^2 \cdot 2 \cdot l}{q} \cdot \varrho \cdot T$ (T = jährliche Betriebsstunden bei der Durchschnittsbelastung und vollem Betriebe), wenn die Spannung gewählt wird. Aus dem Vergleiche der Kosten:

für die Speiseleitungsanlage einerseits

und:

für den jährlichen Effektverlust in Mark ermittelt aus den Selbstkosten pro erzeugte KW-Stunde,
plus den Transportkosten für die Betriebsmaterialien,
plus der Verzinsung des Grundstückserwerbskapitals bzw. des Pachtbetrages für die einzelnen Grundstücke

wird sich dann die wirtschaftlich zweckmäßigste Lage mit ausreichender Sicherheit feststellen lassen [1]).

[1]) Über Wirtschaftlichkeitsberechnungen vgl. Herzog & Feldmann: Die elektrischen Leitungen. Dr. J. Teichmüller: Die elektrischen Leitungen.

29. Die Größe des Kraftwerkes.

Die Energiemengen, die das Kraftwerk bei vollem Betriebe zu erzeugen hat, lassen sich in einfachster Weise aus dem graphischen Fahrplane und dem auf Grund desselben ermittelten Stromverbrauchsdiagramm der einzelnen Strecken finden. Die maximale Strommenge ergibt sich aus dem Stromverbrauche der einzelnen Streckenabschnitte J_1, J_2, J_3 ... J_n für den ungünstigsten Augenblick durch einfache Addition, so daß also

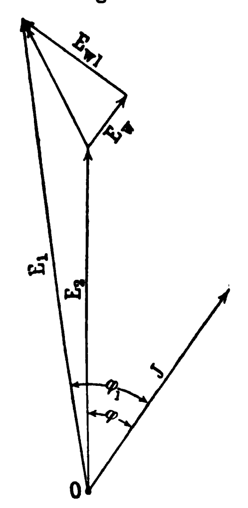
$$J_{max} = J_1 + J_2 + J_3 + \ldots + J_n$$

und somit, wenn die Motorspannung festgesetzt ist, die Leistung der Generatoren bei Gleichstrom

$$P_{max} = \frac{J_{max} \cdot (E_2 + \varepsilon)}{736 \cdot \eta_M} \text{ PS} \quad \ldots \ldots \quad 77)$$

Bei Wechselstrom und Drehstrom dagegen läßt sich die Spannung, die an den Sammelschienen der Zentrale zur Verfügung stehen muß, nicht auf gleich einfache Weise durch das Produkt $E_2 + \varepsilon$ finden. Es tritt vielmehr in einer von Wechselstrom durchflossenen Leitung zu dem Ohmschen noch der induktive Spannungsverlust hinzu, so daß die primäre Spannung E_1 durch geometrische Addition von E_2 und den beiden Komponenten des Spannungsverlustes (Fig. 70)

Fig. 70.



für Wechselstrom

$$E_w = J . W_l$$
$$E_{wl} = J . x_l = J . 2\pi . c . Ll,$$

für Drehstrom

$$E_w = \sqrt{3}\, J . W_l$$
$$E_{wl} = \sqrt{3}\, J . 2\pi . c . Ll$$

erhalten wird. L in Henry bedeutet den Selbstinduktionskoeffizienten der Leitungen[1]).

[1]) Über die Berechnung desselben siehe Fußnote auf S. 123.

Die **maximale Leistung** wird demnach

$$P_{max} = \frac{J_{max} E_1 . \cos \varphi_1}{736 . \eta_M}$$

$$= \frac{J_{max} . \sqrt{(E_2 . \cos \varphi + E_w)^2 + (E_2 . \sin \varphi + E_{wl})^2} . \cos \varphi_1}{736 . \eta_M} \text{ PS} \quad . \ 78)$$

und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung an den Sammelschienen

$$tg\, \varphi_1 = \frac{E_2 . \sin \varphi + E_{wl}}{E_2 . \cos \varphi + E_w},$$

worin φ den Phasenverschiebungswinkel am Motor und φ_1 denjenigen an den Sammelschienen der Zentrale bezeichnet. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ primär kann dann leicht ermittelt werden.

Liegt der Fahrplan noch nicht fest, so kann die **mittlere Leistung**, die von den Generatoren während einer vollen Fahrt abzugeben ist, auch auf folgende rechnerische Art bestimmt werden. Man nimmt die Strecke zunächst als vollkommen eben an; dann ist, wenn L in m die Länge der Strecke und wiederum G in t das gesamte fortzubewegende Gewicht bedeutet, an den Klemmen der Motoren eine Energie

$$P' = \frac{1000 . G . 2 . L . w_1}{75 . 3600 . 1{,}36} \text{ KW-St.}$$

erforderlich. Hierzu treten nun weiter die Energiemengen für das Durchfahren der Kurven:

$$P'' = \frac{1000 . G . 2\, L_k . w_k}{75 . 3600 . 1{,}36} \text{ KW-St.,}$$

und für die Überwindung der Steigungen:

$$P''' = \frac{(s - w_1)\, 1000\, G . L_s}{75 . 3600 . 136} \text{ KW-St.}$$

Ist $s \leqslant w_1$, so können letztere unberücksichtigt bleiben. Es ergibt sich somit für eine volle Hin- und Rückfahrt auf einer bestimmten Strecke die mittlere Leistung des Kraftwerkes angenähert zu:

$$P_{mittel} = \frac{P' + P'' + P'''}{\eta_M \cdot \eta_L}$$

$$= \frac{G}{367,2} [2 (w_1 L + w_k L_k) + L_s (s - w_1)] \text{ KW-St.} \quad . \ 79\,a)$$

oder wenn

$$\eta_M \cdot \eta_L = 0,87 . 0,9 = 0,783$$

$$P_{mittel} = \frac{G}{287,5} [2 (w_1 L + w_k L_k) + L_s (s - w_1)] \text{ KW-St.} \quad . \ 79\,b)$$

Soll auf der Strecke eine Arbeitsrückgewinnung während der Fahrt im Gefälle erzielt werden, so wird sich die mittlere Leistung noch im Verhältnis der für die Talfahrt gewonnenen zu der für die Bergfahrt aufgewendeten reduzieren.

Die gefundene Gesamtleistung wird nun auf eine Anzahl von Generatoren verteilt und zwar zweckmäßig etwa so, daß eine oder zwei Maschinen die maximale Leistung während der Morgen- und Nachtstunden allein zu erzeugen imstande sind, während für den vollen Betrieb weitere Generatoren an der Stromlieferung teilnehmen. Es arbeiten dann die erstgenannten Maschinen mit dem günstigsten Wirkungsgrade, und der Betrieb wird sich unter diesen Gesichtspunkten in weitgehendster Weise wirtschaftlich gestalten lassen. Gilt dieses im allgemeinen für Straßen-, Vorort- und Überlandbahnen, so werden bei Vollbahnanlage wesentlich andere Gesichtspunkte für die günstigste Leistungsverteilung auf eine Reihe von Maschinen zu berücksichtigen sein, weil hier die maximal erforderlichen Strommengen nur vorübergehende sind und die maximale Energieentnahme wesentlich von der Durchschnittsbelastung abweicht. Auch hier wird man nur auf Grund sorgfältiger Überlegungen zu einem befriedigenden Resultate kommen können, denn Regeln lassen sich bei den zahlreichen Ausführungsformen der Bahnanlagen nicht aufstellen.

Über die Wahl der Antriebsmaschinen und ihre Verwendbarkeit in Bahnkraftwerken soll hier jedoch nicht gesprochen werden, weil dieses über den Rahmen des Werkes hinausgehen würde. Man findet hierüber, wenn man die Eigenart des Betriebes und die sich aus demselben ergebenden Bedingungen für das Arbeiten der Antriebsmaschinen in gebührender Weise berücksichtigt, in den Lehrbüchern über Dampfmaschinen, Gasmotoren, Turbinen und schließlich auch in der Hütte genügende Anhaltspunkte.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen soll nun zu den einzelnen Stromarten und der entsprechenden Ausgestaltung des Kraftwerkes selbst übergegangen werden.

30. Gleichstrom-Kraftstation.

Kommt für den Betrieb Gleichstrom zur Anwendung, so bietet dieses System zunächst drei Arten für die elektrische Ausrüstung der Stromerzeugungsstation und zwar mit:

1. Nebenschlußgeneratoren in Verbindung mit einer Akkumulatorenbatterie als sogenannte Pufferbatterie;
2. Compoundgeneratoren;
3. Drehstromgeneratoren in Verbindung mit Umformerstationen.

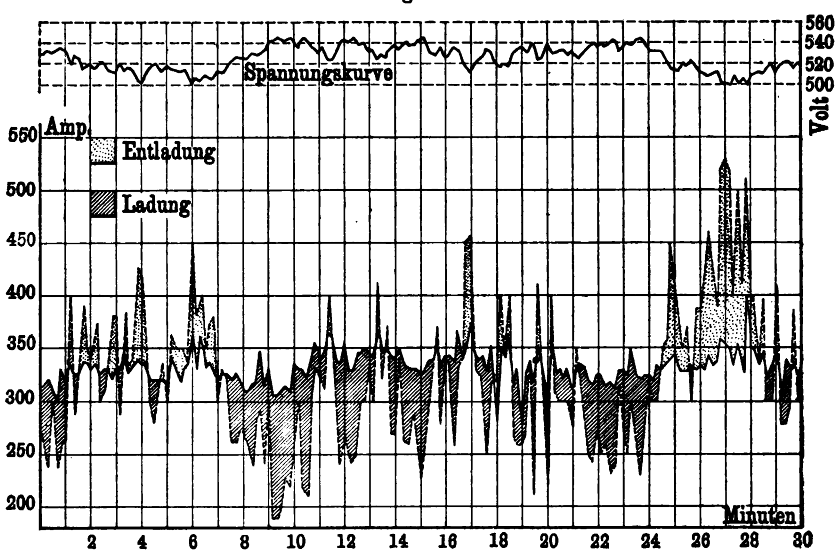
Alle drei Systeme kommen je nach dem Charakter und der Ausdehnung der Bahnanlage zur Ausführung. Die unter 1. genannte Art der Stromerzeugung durch Nebenschlußgeneratoren in Verbindung mit einer Pufferbatterie hat bisher für Straßenbahnen, Vorort-, Industrie- und Überlandbahnen die häufigste Verwendung gefunden und dieses in der Hauptsache bedingt durch die Vorteile, die das System in sich schließt. Durch das gleichzeitige Parallelschalten einer Akkumulatorenbatterie zu den Generatoren werden die momentan auftretenden Stromstöße, die allein schon durch das Anfahren der Züge hervorgerufen werden und im allgemeinen durch die Eigenart des Betriebes bedingt sind, nicht unmittelbar auf die Generatoren und ihre Antriebsmaschinen übertragen, sondern von der Akkumulatorenbatterie aufgenommen. Die puffernde Wirkung der Batterie tritt demnach dadurch zutage, daß sie im Augenblicke stärkeren Strombedarfes die Generatoren in der Stromlieferung unterstützt, während sie bei schwachem Energiebedarf der Strecke den von den Generatoren erzeugten überschüssigen Strom sammelt, somit also geladen und zur Stromunterstützung stets in Bereitschaft gesetzt wird. Sie gleicht demzufolge die durch die schwankende Stromentnahme auftretenden Ungleichförmigkeiten fast vollkommen aus, natürlich nur unter der Voraussetzung, daß ihre Größe zweckmäßig gewählt ist.

Die Generatoren und ihre Antriebsmaschinen können bei Anwendung einer Pufferbatterie in ihren Leistungen kleiner ge-

wählt werden und zwar nur für die mittlere Leistung, die aus dem graphischen Fahrplane ermittelt werden kann. Sie werden bei geschickter Größenbestimmung der einzelnen Maschinensätze während des ganzen Betriebes nahezu dauernd normal belastet laufen, und arbeiten infolgedessen mit dem günstigsten Wirkungsgrade.

Wie vorteilhaft sich die Parallelschaltung einer Akkumulatorenbatterie zu den Generatoren gestaltet, zeigt Fig. 71, die

Fig. 71.



während des Betriebes praktisch aufgenommene Messungen[1]) über die puffernde Wirkung einer Batterie wiedergibt. Es ist aus den Kurven deutlich zu erkennen, wie ein fortwährendes Laden und Entladen der Batterie stattfindet. Auch die Spannungsschwankungen sind in einer Kurve veranschaulicht.

Bei kleineren Kraftwerken ist man aber weiter in der Lage, die Pufferbatterie zur alleinigen Stromlieferung während der ersten Morgenstunden heranzuziehen, ein Umstand, der gleichfalls

[1]) Vgl. Pufferbatterien im Straßenbahnbetriebe von Heinr. Wille. E. B. u. B. 1905, Heft 1 und 3.

zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung wesentlich beiträgt.

Für die Größenbestimmung der Generatoren ist noch der Wirkungsgrad der Pufferbatterie zu berücksichtigen, der im Hinblick darauf, daß dieselbe nur einen kleinen Teil der erforderlichen Energie liefert, praktisch mit $\eta_A = 0{,}85$ bis 0,9 angenommen werden kann, so daß also

$$P_{mittel} = \frac{G}{367{,}2 \,.\, \eta_L \,.\, \eta_M \, \eta_A} \left[2\,(L w_1 + L_k w_k) + L_s\,(s - w_1)\right] \text{KW-St.}$$

Die Größe der Batterie ergibt sich aus der gewünschten Spannung an den Sammelschienen und der momentan auftretenden Höchstleistung P_{max} abzüglich der von den Generatoren erzeugten P_{mittel}, so daß die Zellenzahl Z

$$Z = \frac{\text{Sammelschienenspannung}}{2{,}07} \quad \ldots \ldots \quad 80)$$

wenn angenommen wird, daß die einzelnen Zellen im Durchschnitt eine Spannung von 2,07 Volt besitzen, und die Kapazität bei einstündiger Entladung

$$C = \frac{P_{max} - P_{mittel}}{\text{Sammelschienenspannung}} \quad \ldots \ldots \quad 81)$$

Die Ladung der Batterie erfolgt während der Betriebspausen von den Generatoren aus unter Zwischenschaltung einer Zusatzdynamo.

In Tafel VII ist das vollständige Schaltungsschema eines Kraftwerkes für Gleichstrom mit Pufferbatterie und Zusatzaggregat dargestellt. Die beiden Bahngeneratoren G_1. und G_2. arbeiten unter Zwischenschaltung des Ausschalters *A.* bzw. des selbsttätigen Maximalausschalters *Ma. A.*, der Sicherungen *S.*, eines Stromzeigers und Zählers direkt auf die Sammelschienen, deren positive Seite durch die Speiseleitungen mit der Oberleitung und deren negative Seite mit den Laufschienen verbunden ist. Die Pufferbatterie ist parallel an die Sammelschienen angeschlossen und enthält in ihrem Stromkreise ebenfalls Schalt-, Meß- und Sicherungsapparate, wobei auch hier der positive Pol zweckmäßig mit einem automatisch wirkenden Maximalausschalter verbunden wird, um die Batterie vor Überlastung durch Kurzschluß usw. zu schützen. Das Aufladen der Batterie erfolgt wie schon erwähnt

mittels eines Zusatzaggregates, bestehend aus einem Gleichstromnebenschlußmotor direkt gekuppelt mit einem Gleichstromgenerator. Der Motor erhält neben dem Anlasser noch einen Nebenschlußregulator, um die Tourenzahl in den durch die gewünschte Spannungsänderung bedingten Grenzen ändern zu können, oder aber der Generator ist besser noch mit Fremderregung zu versehen.

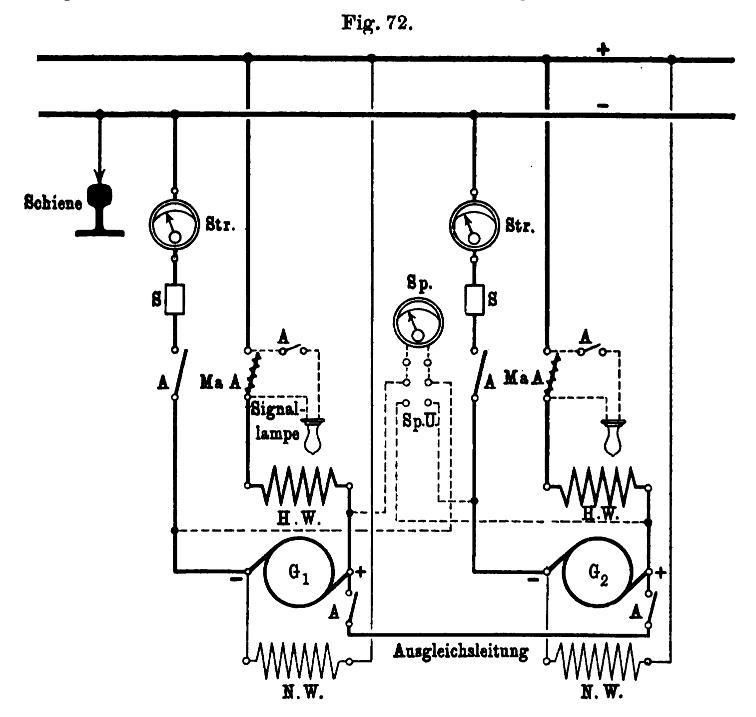
Sind die Achsentriebmotoren Nebenschlußmotoren und soll durch dieselben Energierückgewinnung erzielt werden, handelt es sich demnach um Betrieb auf Bergbahnen, so kann leicht der Umstand eintreten, daß sich zeitweise mehr oder nur Züge auf der Talfahrt befinden und der von ihnen erzeugte Strom dem Kraftwerke direkt zugeführt wird. Um nun den Rückstrom, soweit er die maximale Ladestromstärke der Batterie übersteigt, aufzunehmen, die Batterie also zu sichern, kann parallel zu den Sammelschienen ein Belastungswiderstand — in der Regel ein einfacher Wasserwiderstand — angeschlossen werden, dessen Berechnung nach dem bisher Gesagten keinerlei Schwierigkeiten bietet. Auch dieser Stromkreis wird zweckmäßig mit Schalt- und Meßinstrumenten ausgestattet (Tafel VII). Es läßt sich bei entsprechend größerer Wahl der Akkumulatorenbatterien der Widerstand auch vermeiden und so die gesamte zurückgewonnene Energie nutzbringend aufspeichern, doch wird hier stets das Anlagekapital, die Verzinsung usw., also die Wirtschaftlichkeit ausschlaggebend sein.

Die Ausgestaltung eines modernen Kraftwerkes mit Haupt- und Zusatzmaschinen, sowie Schaltanlage ist in Tafel VIII zur Darstellung gebracht. Man erkennt aus derselben, wie beispielsweise eine zweckmäßige Aufstellung der Generatoren und ihrer Antriebsmaschinen mit Rücksicht auf eine bestmögliche Übersicht von der Schalttafel aus zu erfolgen hat. Tafel VIII zeigt die Stromerzeugungsstation für die Rheinuferbahn Cöln—Bonn, die von den Siemens-Schuckert-Werken erstellt wurde. Die Generatoren, die eine Leistung von je 350 KW bei 1000 Volt Spannung erzeugen, sind mit je einer liegenden Tandemverbund-Dampfmaschine mit Kondensation unmittelbar gekuppelt. In der Mitte des Maschinenraumes haben noch Zusatz- und Ausgleichsaggregate Aufstellung gefunden.

Eine weitere elektrische Ausführung der Bahngeneratoren, wie sie namentlich in Amerika starke Verbreitung gefunden hat,

ist diejenige mit Compoundwickelung. Die Maschinen erhalten demnach zwei getrennte Wickelungen und zwar eine Hauptstromwickelung und eine Nebenschlußwickelung. Man erzielt durch eine derartige Wickelungsanordnung gleichfalls eine konstante Spannung bei schwankender Belastung an den Sammelschienen bzw. Speisepunkten der Strecke und einen ruhigen Gang der Antriebsmaschinen. Die Wirkungsweise der beiden

Fig. 72.



Wickelungen kann wohl als bekannt vorausgesetzt werden. Arbeiten mehrere Compoundgeneratoren parallel, so hat die Schaltung derselben nach Fig. 72 zu erfolgen, und zwar müssen die + Pole sämtlicher parallel arbeitenden Maschinen miteinander durch eine Ausgleichsleitung verbunden werden. Würde letztere nicht vorgesehen werden, wären also die Generatoren nur in bezug auf die Sammelschienen parallel geschaltet, so würde, wenn z. B. die Nebenschlußerregung der einen Maschine aus

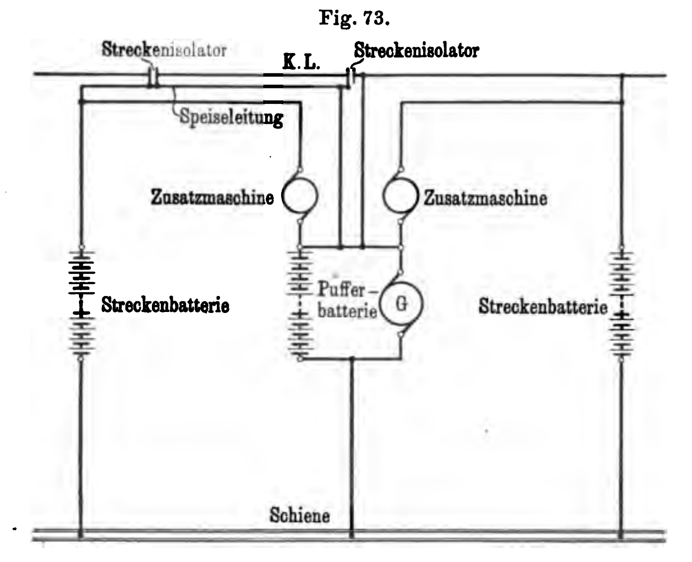
irgend einem Grunde etwas schwächer, als die der zweiten sein würde, letztere sofort die ganze Stromlieferung übernehmen, ja sogar Strom in die erstere hineinschicken und diese als Motor antreiben. Es würde dabei dann eine Umkehr der Stromrichtung in der Hauptstromwickelung eintreten und dadurch, daß die Nebenschlußerregung immer mehr und mehr aufgehoben würde, ein Durchgehen der Maschine hervorgerufen werden. Um dieses zu verhüten, wird die genannte Ausgleichsleitung angeordnet, die die an den Anker angeschlossenen + Klemmen der Hauptstromwickelungen aller Maschinen untereinander verbindet. Eine Stromumkehr in der Hauptstromwickelung ist infolgedessen unmöglich, da ein Steigen des Ankerstromes in der einen Maschine die Erregung aller anderen gleichfalls beeinflußt.

In Deutschland findet man Compoundgeneratoren in Bahnkraftwerken verhältnismäßig selten. Sie werden etwa nur dann gewählt werden, wenn für kleinere Anlagen die Beschaffung einer Akkumulatorenbatterie und die mit derselben verbundenen doch immerhin recht erheblichen Unterhaltungs- und Abschreibungskosten die Rentabilität stark beeinträchtigen würden.

Muß das Kraftwerk in größerer Entfernung von den zu speisenden Strecken angelegt werden, oder hat der Ausbau eines mit Gleichstrom betriebenen Bahnnetzes so weit um sich gegriffen, daß für die neuen Strecken eine direkte Speisung von dem bestehenden Kraftwerke nicht mehr ratsam erscheint, so kommt die unter 3. genannte Ausführung der Stromerzeugerstation mit Drehstromgeneratoren in Verbindung mit Umformerwerken zur Anwendung. Der von ersteren erzeugte hochgespannte Strom wird in Städten mittels unterirdisch verlegter Kabelleitungen, in weniger bewohnten Gegenden durch oberirdische Leitungsführung einzelnen an der Bahnstrecke gelegenen Umformerwerken zugeführt und dort mit Hilfe rotierender Umformer oder Motorgeneratoren in Gleichstrom umgewandelt. Die Zahl der Unterstationen kann mit Rücksicht auf die Kosten für Anlage und Unterhaltung naturgemäß nur eine beschränkte sein, und die Bestimmung der Lage und Größe derselben gleicht im allgemeinen derjenigen für das Kraftwerk selbst, denn als solches in erweitertem Sinne ist ersteres anzusehen. Auch hier wird zweckmäßig eine Pufferbatterie zum Ausgleich der Stromschwankungen aufgestellt.

Der Antrieb der Gleichstromgeneratoren erfolgt in der Regel durch asynchrone Hochspannungsdrehstrommotoren bzw. durch letztere unter Zwischenschaltung eines Transformators. In Tafel IX ist das Schaltungsschema eines derartigen Kraftwerkes mit Unterstation angegeben, dessen primärer Teil weiter unten Erklärung finden soll. Die sekundäre Seite enthält einen Drehstrommotor direkt gekuppelt mit einem Gleichstrom-Bahngenerator, der unter Berücksichtigung der üblichen Sicherheits-, Schalt- und Meßapparate auf die Sammelschienen arbeitet, von denen die Speiseleitungen zu den einzelnen Streckenabschnitten führen. Der

Fig. 73.



negative Pol ist wiederum mit den Laufschienen verbunden. Eine parallel zu den Sammelschienen geschaltete Pufferbatterie sorgt auch hier für den Ausgleich der Stromschwankungen. An die Hochspannungsfernleitung ist noch ein Spannungszeiger *Sp. Z.* mit einem durch die Spannungssicherung *Sp. S.* gesicherten Spannungstransformator *Sp. Tr.* angeschlossen, um jederzeit kontrollieren zu können, ob die Fernleitung unter Spannung steht. Zum Schutze der Hochspannungssammelschienen gegen Blitzgefahr und Überspannungen dient der Blitzschutz *B.*, der in Tafel IX nur schematisch angedeutet ist und je nach der Höhe der Spannung, mit

Rücksicht auf die Gegend, in der die Unterstationen liegen, und die Länge der Fernleitung stets besonders gewählt werden muß. Auch die Speiseleitungen erhalten zweckmäßig Blitzschutzvorrichtungen.

In Tafel X ist ein derartiges Umformerwerk dargestellt. Man erkennt aus derselben wiederum die Anordnung der Generatoren mit ihren Antriebsmaschinen, in diesem Falle asynchronen Drehstrommotoren und die Schaltanlage, wie überhaupt die überraschende Einfachheit eines derartigen Werkes.

Ein weiteres Mittel zur Unterstützung des Kraftwerkes bei ausgedehnteren Gleichstrombahnanlagen bildet die Aufstellung einzelner Batterien, sogenannter Streckenbatterien, für entfernter gelegene Streckenabschnitte. Man erzielt hierdurch gleichfalls einen vorzüglichen Belastungsausgleich für die Strecke und somit für das Kraftwerk selbst. Die Ladung der Streckenbatterien erfolgt zumeist über besondere Leitungen von den Generatoren der Hauptzentrale aus unter Zwischenschaltung von Zusatzmaschinen [1]). Die Schaltung ist in Fig. 73 gekennzeichnet.

31. Wechselstrom- und Drehstrom-Kraftstation.

Soll der Betrieb direkt mit Wechselstrom und zwar Einphasen- oder Dreiphasenstrom erfolgen, so gewinnt man mit dem Vorteile der Hochspannung zugleich auch denjenigen, mit der Wahl für die Lage des Kraftwerkes nicht an enge Grenzen gebunden zu sein, sondern letzteres an dem für dasselbe günstigst erscheinenden Orte errichten zu können. Bei entsprechender Spannung an den Sammelschienen kann dann der Querschnitt der Speiseleitungen verhältnismäßig gering, im Minimum nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker mit 10 qmm gewählt werden, so weit dieses der prozentuale Spannungsverlust mit Rücksicht auf die Höhe der Spannung zuläßt. Soll die Arbeitsleitung nicht unmittelbar Hochspannung führen, sondern der Betrieb der Achsentriebmotoren mit niedriggespanntem Strome erfolgen, so werden, wie im sechsten Kapitel erwähnt, längs der Strecke in rechnerisch zu bestimmenden

[1]) Solche Streckenbatterien sind auch bei der Rheinuferbahn zur Verwendung gekommen. Das Schema Fig. 73 entspricht der bei dieser Anlage getroffenen Schaltung; vgl. E. B. u. B. 1906.

Abständen Transformatoren aufgestellt, die die Speiseleitungsspannung auf den gewünschten Wert für die Arbeitsleitung transformieren.

Für die Bestimmung der Größe der Generatoren ist hier jedoch nicht die mittlere Leistung, wie für Gleichstromgeneratoren, sondern die maximal auftretende P_{max} maßgebend, wobei die zulässige Überlastungsfähigkeit der Generatoren zu berücksichtigen ist. Man hat auch hier den Versuch gemacht, Pufferbatterien unter Zwischenschaltung automatischer Reguliervorrichtungen und eines kleinen Umformeraggregates zur Anwendung zu bringen, doch ist eine derartige Ausgestaltung eines Wechsel- oder Drehstromkraftwerkes für Bahnbetrieb praktisch bisher nicht ausgeführt worden [1]).

Wünscht man auf Bergbahnen, die mit Drehstrom betrieben werden, Energierückgewinnung zu erzielen, so kann gleichfalls parallel zu den Sammelschienen ein Belastungswiderstand geschaltet werden, der geeignet ist, bei zu starkem Rückstrome die überflüssige elektrische Energie zu vernichten. Ein weiteres Hauptaugenmerk ist auf gute, sichere und möglichst automatisch wirkende Regulierung der Spannung der Generatoren bzw. des Ganges der Antriebsmaschinen zu richten, um bei plötzlich auftretenden Entlastungen letzterer ein Durchgehen der Maschinen zu verhindern. Es kann dieses entweder durch selbsttätig regulierende Erregerstromregulatoren in Verbindung mit Spannungsrelais erfolgen oder durch auf die Regulatoren der Dampfmaschinen bzw. Turbinen wirkende Vorrichtungen, von denen eine ganze Reihe in die Praxis eingeführt sind.

Tafel IX zeigt nun auf der linken Seite die vollständige Schaltung eines Drehstromkraftwerkes, wie es auch bei Umformeranlagen als Primärstation ausgeführt wird. Die den Strom erzeugenden Generatoren $D\,G_1$ und $D\,G_2$ sind bei mittelgroßen Anlagen mit ihren Erregermaschinen direkt gekuppelt, während bei großen Kraftwerken besondere Gleichstromgeneratoren mit eigenen Antriebsmaschinen zur Erzeugung der für die Erregung erforderlichen Energie aufgestellt und an besondere Gleichstrom-

---

[1]) Es ist diese Schaltung bei großen Drehstrom-Förderanlagen schon häufiger angewendet worden, um auch hier die starken Stromstöße, namentlich bei Anfahren zu vermindern (so von der Akkumulatorenfabrik A.-G. für die Zeche Konstantin bei Dortmund).

sammelschienen angeschlossen sind. In den Drehstrom-Hochspannungsstromkreis sind erstens zwei Strommesser *Str. Z.* mit Stromtransformatoren *Str. Tr.* eingebaut, die ohne Schwierigkeit die Belastungen der Phasen erkennen lassen und gleichzeitig als Kontrollinstrumente dienen, sowie ein an einen Strom- und Spannungstransformator *Sp. Tr.* angeschlossener Leistungszeiger *L. Z.* für gleichbelastete Phasen, der die jeweilige Belastung der einzelnen Generatoren anzeigt und ein Spannungszeiger *Sp. Z.*, Ausschalter und Sicherungen vervollständigen die für einen geordneten Betrieb erforderlichen Apparate. Es werden neuerdings die beiden letzteren zu einem Schaltapparate vereinigt und zwar zu einem sogenannten automatischen Schalter mit Maximal- und Spannungsrelais. Mit Hilfe letzterer kann der Schalter einmal bei einer eine gewisse Zeit überschreitenden starken Überlastung und dann auch beim Sinken oder plötzlichen Ausbleiben der Spannung zum selbsttätigen Ausschalten gebracht werden. Auch die Speiseleitungen erhalten zweckmäßig derartige Schalter. Werden zwei oder mehr Maschinen zur Energielieferung herangezogen, so erfolgt das Parallelschalten der einzelnen Generatoren auf Grund der Ablesungen an zwei bzw. drei Voltmetern und der Beobachtung von sogenannten Phasenlampen. Auf den Blitz- und Überspannungsschutz für Sammelschienen und Speiseleitungen ist wiederum besonders Rücksicht zu nehmen. Um die einzelnen Generatoren zwecks Untersuchung und Reparatur vollständig von den unter Spannung stehenden Sammelschienen abtrennen zu können, sind zweckmäßig in den Maschinen- und Sammelschienenstromkreis Abschalter oder Trennschalter *Ab. S.* einzubauen.

Für die Ausführung der Generatoren, Schaltanlagen usw. im allgemeinen sind in Deutschland die bereits des öfteren erwähnten Sicherheitsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker maßgebend.

SACHREGISTER.

A.

B.

C.

D.

E.

F.

G.

H.

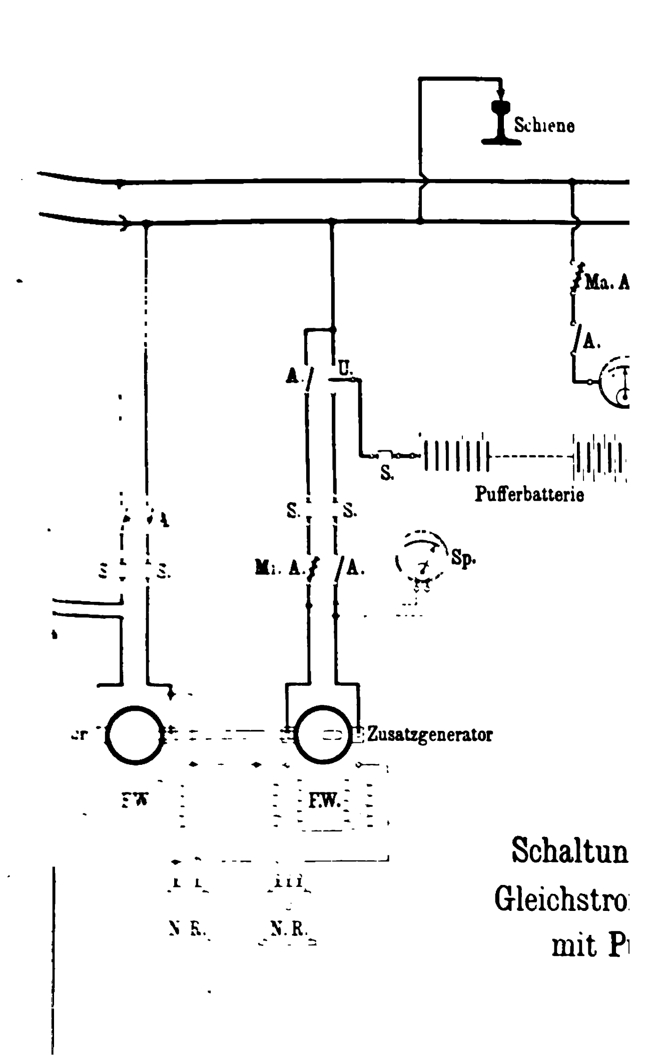
I.

K.

L.

M.

N.



Schaltun
Gleichstro
mit P

Friedr. Vieweg & Sohn in



Zur Unterstatic

Ab. S.

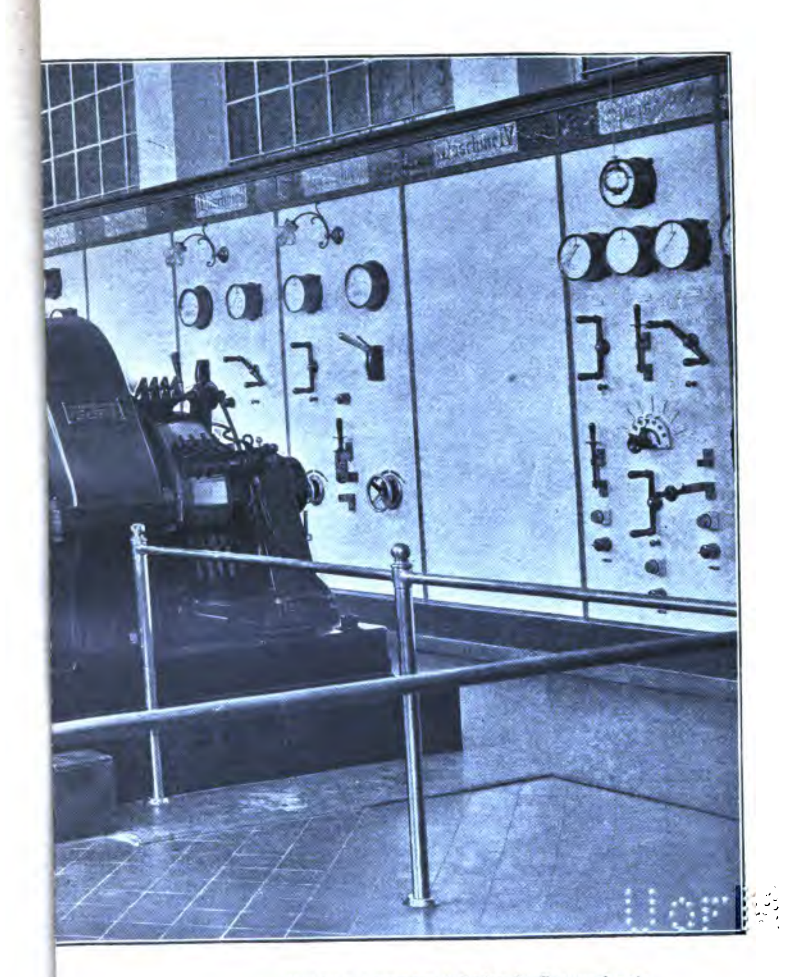
Blitz- u.
Überspannung

B.

E.

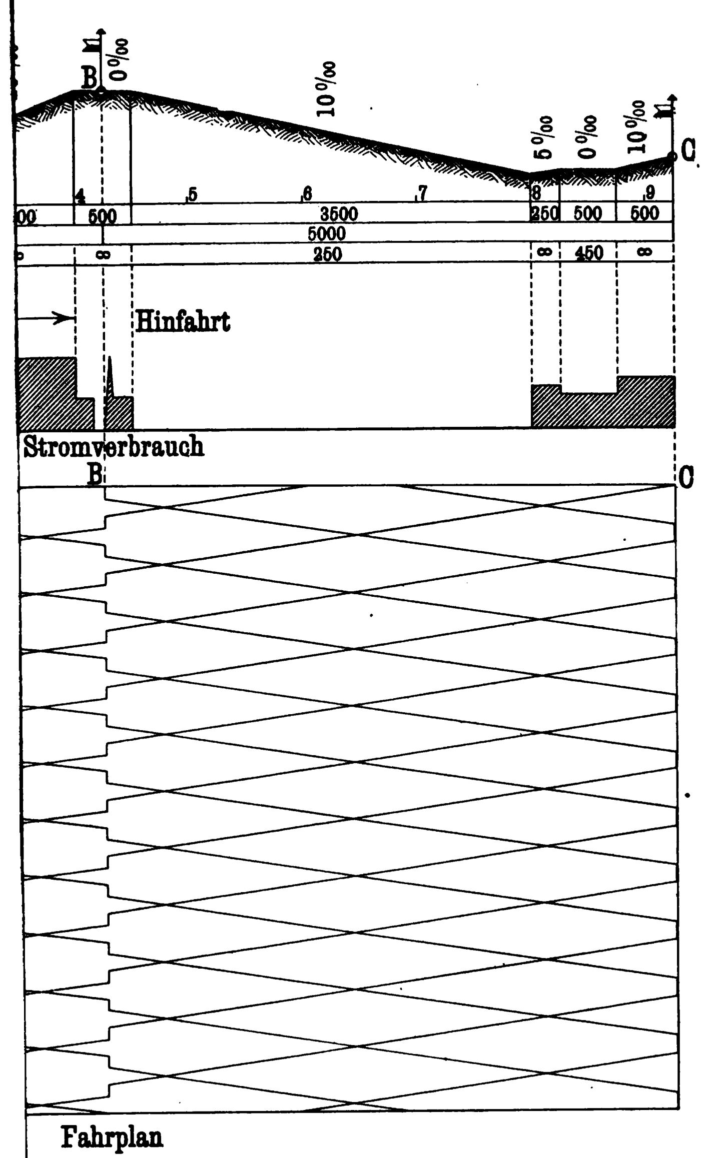
Schaltun
m

Tafel X.



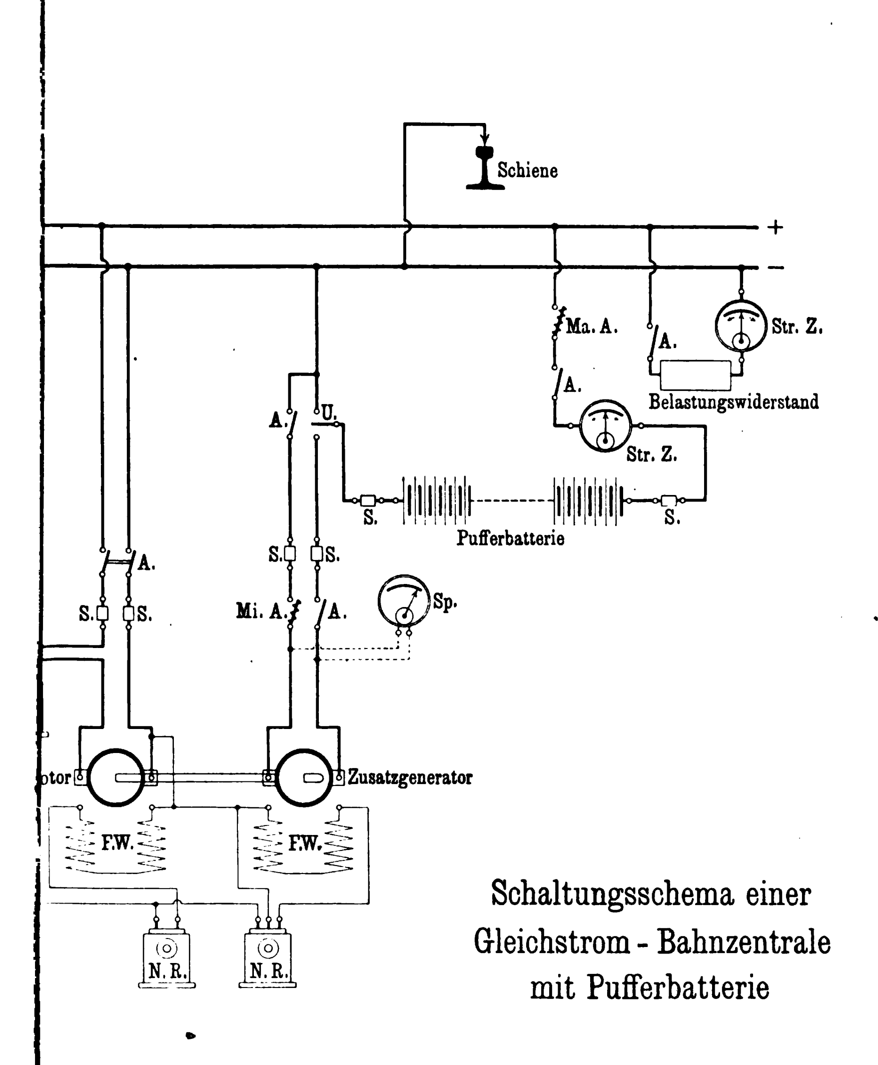
Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Tafel VI.



Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Tafel VII.



Schaltungsschema einer Gleichstrom - Bahnzentrale mit Pufferbatterie

Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.



Schaltun
m

Tafel X.



Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Ankündigung.

Im unterzeichneten Verlage ist soeben erschienen:

Leerlauf- und Kurzschlufsversuch

in Theorie und Praxis

von

J. L. la Cour,

Privatdozent an der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.

Mit 72 eingedruckten Abbildungen.

Gr. 8°. VIII und 127 Seiten. Preis geheftet *M.* 3,50.

Diese Arbeit ist in erster Linie für die Studierenden an technischen Hochschulen und die Ingenieure der Praxis bestimmt, welche bereits eingehende Kenntnisse in den Wechselstromproblemen besitzen.

In dem kleinen, kurzgefaßten Werke behandelt der Verfasser alle Probleme der Wechselstromtechnik von demselben Gesichtspunkte aus und zeigt, daß es mittels der einfachen Leerlauf- und Kurzschlußmessungen möglich ist, nicht allein das ganze Verhalten einer elektrischen Maschine oder Anlage klar zu legen, sondern auch die Eigenschaften derselben exakt zu bestimmen. Das Werk wird deswegen für die Ingenieure und Studierenden besonders von Wert sein, die sich mit praktischen aber doch exakten Untersuchungen an elektrischen Maschinen und Anlagen beschäftigen.

Die Verlagsbuchhandlung Friedr. Vieweg & Sohn

in Braunschweig.

Inhaltsverzeichnis.

Ankündigung.

Das Werk „Physikalisches Praktikum“ von E. Wiedemann und H. Ebert soll es ermöglichen, auch ohne umfangreichere Vorkenntnisse physikalische Messungen und damit zusammenhängende Versuche auszuführen. Dasselbe ist zunächst für Studierende bestimmt, die, ehe sie an schwierigere Messungen in den einzelnen Gebieten gehen, sich einen Überblick über die wichtigsten Meßmethoden der gesamten Physik und physikalischen Chemie verschaffen müssen, dann aber auch für Lehrer, Chemiker, Pharmazeuten, Elektrotechniker und andere.

Der gesamte Stoff ist in eine Reihe von einzelnen Abschnitten und Übungen gegliedert.

Bei jedem einzelnen Abschnitt ist zunächst unter dem Titel „Gebraucht wird“ alles zusammengestellt, was an Apparaten usw. für die einzelnen Übungen nötig ist. Hierdurch und dadurch, daß die Verfasser bei den Versuchen die Operationen bis ins einzelne beschrieben und auch scheinbar unwesentliche Kleinigkeiten nicht übergangen haben, hoffen sie, nicht nur dem in einem Institut arbeitenden Praktikanten, sondern auch dem Lehrer, dem Chemiker, dem Elektrotechniker, der nach Beendigung des Studiums das Buch benutzen will, seine Aufgabe wesentlich erleichtert zu haben.

Einem jeden Abschnitt ist eine Einleitung vorausgeschickt, in welcher die allgemeinen Gesetze, die in ihm zur Anwendung kommen, erörtert, und die Größen, die gemessen werden sollen, definiert sind. Dadurch wird es ermöglicht, auch ohne Zuhilfenahme eines besonderen Lehrbuches sich auf die auszuführenden Messungen vorzubereiten, denn selbst für Fortgeschrittenere ist es oft schwierig, aus einem größeren Lehrbuche dasjenige herauszufinden, dessen sie für eine bestimmte Übung bedürfen. Derjenige, der sich eingehender mit einer Frage beschäftigen will, findet nach dem Studium des einleitenden Teiles um so eher in ausführlichen physikalischen Werken die Abschnitte, die mit seiner Aufgabe zusammenhängen.

In den Einleitungen werden auch die nötigen Formeln, indes entsprechend der Tendenz des Buches ohne Zuhilfenahme höherer Mathematik, abgeleitet.

Besondere Vorübungen sind zum Teil Wiederholungen von Vorlesungsversuchen. Sie sollen dazu dienen, die Grundgesetze fester einzuprägen und diejenigen Gesichtspunkte hervorzuheben, welche bei der Konstruktion der Meßapparate und bei den behandelten Methoden in Frage kommen. Jeder, der sich eingehender mit jüngeren Studenten beschäftigt, weiß, wie nötig solche Vorübungen sind, da nur zu häufig

die in der Vorlesung vorgeführten Erscheinungen nicht vollkommen beobachtet und verstanden werden. Diese Abschnitte dürften besonders auch für Lehrer manches Anregende besitzen, da sie sich zu Schul- und Schülerversuchen eignen.

Die Übungen selbst sind je nach der Natur der in Frage kommenden Erscheinung qualitative oder quantitative. In letzterem Falle wird gezeigt, wie sich aus den einzelnen Beobachtungsdaten diejenigen Größen ableiten, welche in der entsprechenden Formel enthalten sind. Die Berechnung ist so geführt, daß der Praktikant nicht einfach die erhaltenen Werte in die Formel einzusetzen braucht, sondern daß er den Gedankengang, welcher zu derselben geführt hat, noch einmal durchdenken muß. In vielen Fällen ist die Berechnung an einem Zahlenbeispiele erläutert, das zugleich ein Maß für die erreichte Genauigkeit gibt. Die Zahlen sind solche, wie sie von Praktikanten bei den Übungen erhalten worden sind. Diese Art der Behandlung dürfte auch für den Praktiker von Wert sein, der nach seinem Studium physikalische Messungen auszuführen hat.

Die Messungen und Korrektionen sind so eingehend behandelt, wie dies für die gewöhnlich bei physikalischen und physikalisch-chemischen Messungen erstrebte Genauigkeit erforderlich ist.

Den Schluß eines jeden Abschnittes bilden Zusammenfassungen der experimentellen und theoretischen Ergebnisse der Übungen bezw. solcher, die sich unmittelbar daran anschließen; dabei ist besonders Gewicht auf die Resultate der physikalischen Chemie gelegt.

Die praktische Anlage des Buches ist wesentlich dadurch gefördert worden, daß es zunächst längere Zeit in dem physikalischen Institut zu Erlangen auf Fahnen benutzt werden konnte.

In der neuen Auflage haben besonders die elektrischen Messungen im allgemeinen, sowie einige elektrotechnische eine eingehendere Behandlung gefunden, so daß das Buch auch für den elektrotechnischen Unterricht in erhöhtem Maße verwendbar geworden ist.

Für die Zusammenstellung der Tabellen konnten die Verfasser mit gütiger Erlaubnis der Herren Autoren solche von F. Kohlrausch, Landolt und Börnstein, Ostwald, Quincke und Seubert benutzen; bei der Bearbeitung des Textes sind ihnen mannigfache Ratschläge von Fachgenossen sehr zu statten gekommen. Den genannten Herren sind die Verfasser des Buches wie die Verlagsbuchhandlung für ihre Unterstützung zu großem Dank verpflichtet.

Das Buch liegt hiermit bereits in fünfter Auflage vor, die rasche Aufeinanderfolge der Auflagen spricht am besten für die Brauchbarkeit desselben.